

UCL

**Université
catholique
de Louvain**

**Elaboration d'outils méthodologiques et techniques
d'aide à la conception d'ambiances urbaines
de qualité pour favoriser
le développement durable des villes**

Thèse de doctorat

**Soutenue en vue de l'obtention du diplôme de
Docteur en Sciences Appliquées**

Sigrid Reiter

Promoteur

Prof. André De Herde

Membres du jury

Prof. André De Herde (UCL)

Prof. Christian Gilot (UCL et EPFL)

Prof. (honoraire) Domenico Olivari (Institut von Karman)

Prof. Hervé Jeanmart (UCL)

Prof. David Vanderburgh (UCL)

Faculté des Sciences Appliquées

Architecture et Climat

Juin 2007

« Savoir, c'est comprendre comme la moindre chose est liée au tout. »

Emile Chartier

Remerciements

Avant tout entrée en matière, je souhaite remercier vivement tous ceux qui, par leur aide, leurs conseils et leurs encouragements, m'ont aidée à élaborer et finaliser cette thèse de doctorat.

Je suis particulièrement reconnaissante au Professeur André De Herde de m'avoir accueillie dans son équipe de recherche ainsi que pour le soutien permanent et chaleureux qu'il m'a témoigné depuis que je travaille à Architecture et Climat. Je le remercie également d'avoir accepté d'être mon promoteur de thèse et pour la totale confiance qu'il m'a accordée dans l'élaboration de ce travail.

Ma gratitude s'adresse également à la Région de Bruxelles-Capitale qui a financé en grande partie ma thèse de doctorat par l'intermédiaire du programme de recherches « Prospective Research for Brussels ». Sans cette bourse doctorale, je n'aurais pas pu entreprendre cette thèse. Je désire également transmettre mes remerciements à la Politique Scientifique Fédérale grâce à laquelle j'ai pu achever et soutenir cette thèse de doctorat dans le cadre du contrat de recherche multidisciplinaire DRUPSSuC du programme de recherches « Science for a Sustainable Development ».

Je remercie chaleureusement le Professeur Christian Gilot (AUCE, UCL) et le Professeur honoraire Domenico Olivari (Institut von Karman) pour avoir accepté de faire partie du comité d'accompagnement de mon doctorat et pour les conseils judicieux qu'ils m'ont promulgués. J'envoie également mes remerciements sincères au Professeur Hervé Jeanmart (MECA, UCL) pour avoir accepté d'évaluer ce doctorat et de faire partie du jury. Je remercie enfin le Doyen Jean-Didier Legat et le Professeur David Vanderburgh d'assurer la présidence du jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mme Catherine Sémidor du laboratoire Grecau de Bordeaux pour avoir partagé avec moi ses compétences en acoustique urbaine. Je désire également exprimer ma gratitude profonde à M. José Flémal pour les superbes illustrations qu'il a réalisées et qui participent à la mise en valeur de ma recherche. Un tout grand merci à tous les membres d'Architecture et Climat pour l'accueil qu'ils m'ont témoigné et pour le plaisir que j'ai eu à travailler à leurs côtés tout au long de cette recherche doctorale.

L'élaboration de cette thèse a été pour moi une expérience riche en questionnements, découvertes, voyages, rencontres et évolutions. Que tous ceux qui y ont contribué de près ou de loin en soient remerciés. Je pense plus particulièrement à ma famille et à mes amis qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de son développement.

Résumé

Cette thèse de doctorat consiste à élaborer des outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes.

Ce travail de thèse s'inscrit dans la recherche de nouveaux modes de conception de notre espace habité pour assurer le développement durable des villes. Il vise à promouvoir un nouveau rapport de la société à l'espace public urbain, à travers la création d'ambiances urbaines de qualité, confortables et adaptées aux conditions climatiques locales.

Cette thèse propose un éclairage spécifique et technique des ambiances urbaines, tout en l'insérant dans une approche architecturale globale. Dans une première partie, cette thèse étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour promouvoir une conception architecturale et urbaine respectueuse de l'homme et de l'environnement. Dans une seconde partie, ce travail de thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics, selon une approche innovante du confort à l'extérieur qui consiste à regrouper les points de vue physiologiques et psychologiques. Dans une troisième partie, cette thèse décrit les moyens existants et développe de nouveaux outils méthodologiques et techniques pour concevoir des ambiances urbaines de qualité du point de vue microclimatique et acoustique. Ces outils permettront aux différents acteurs du processus de conception et de réalisation des projets urbains d'identifier dans le tracé de leurs plans masses les zones susceptibles d'être critiques ou clémentes pour les piétons en fonction du microclimat et de l'acoustique. Signalons notamment le développement d'outils graphiques simplifiés pour déterminer les risques d'inconfort au vent autour des bâtiments, à partir de nombreuses simulations numériques CFD (Computational Fluid Dynamics).

Cette thèse de doctorat aidera donc concrètement les concepteurs et les décideurs de projets urbains à évaluer la qualité d'un espace public réel ou projeté et ainsi guidera leurs choix d'aménagement. Les stratégies de conception et les outils de calcul simplifiés développés dans cette thèse faciliteront la conception d'ambiances urbaines confortables pour les piétons.

Les résultats de cette recherche soulèvent une interrogation sur le type de société que nous désirons promouvoir. Ils soulignent l'importance du rôle des espaces publics urbains pour améliorer l'habitabilité de nos villes et valorisent un développement de l'humanité qui soit éthique et pas seulement financier. Ils ont été rédigés dans le but de participer à une prise de conscience collective, ce qui ne peut se réaliser que par la sensibilisation du public, l'information donnée aux décideurs politiques et la formation des concepteurs de projets. C'est pourquoi une attention particulière a été portée sur l'aspect graphique de cette thèse et sur le choix de nombreuses illustrations afin qu'elle soit agréable à lire pour les différents acteurs concernés.

Table des matières

Introduction		7
	Les enjeux de cette thèse de doctorat	
	Les objectifs de cette thèse de doctorat	
	La méthode de travail	
	Le caractère innovant	
	Thèmes et structure de cette thèse de doctorat	
1. Elaboration d'une définition d'un espace public durable		19
1.1 Développement durable des urbanisations		19
1.1.1	Le concept de « développement durable »	19
1.1.2	Le développement insoutenable de nos urbanisations	21
1.1.3	Les principes de la conception durable des espaces publics urbains	38
1.2 Contextualité		40
1.2.1	L'intégration	42
1.2.2	La participation	52
1.2.3	L'adaptation	66
1.3 Coexistence		74
1.3.1	Le rassemblement	75
1.3.2	La diversité	87
1.3.3	L'ouverture	102
1.4 Cohérence		112
1.4.1	L'identité	113
1.4.2	Le sens	120
1.4.3	La naturalité	132
1.5 Stratégie de conception et de rénovation d'un espace public durable		142
2. Elaboration d'une nouvelle méthode d'évaluation du confort à l'extérieur		145
2.1 Confort des piétons		145
2.1.1	Les différences entre le confort intérieur et extérieur	148
2.1.2	Le processus d'adaptation	149
2.2 Critères qualitatifs du confort extérieur		152
2.2.1	L'identification d'une ambiance	153
2.2.2	La relation au contexte	156
2.2.3	La continuité des conditions environnementales	158
2.2.4	La diversité des ambiances	160
2.2.5	La variabilité des conditions environnementales	164
2.2.6	La perception du contrôle possible	166
2.2.7	La capacité de s'adapter	168
2.2.8	La naturalité du lieu	171
2.2.9	Le caractère signifiant du lieu	174
2.2.10	La globalité de la sensation de confort	178

2.2.11	Les composantes culturelles et individuelles	182
2.2.12	Similitudes entre les concepts fondateurs d'un espace public durable et les critères qualitatifs du confort des piétons	184
2.3	Critères quantitatifs du confort extérieur	186
2.3.1	Les critères quantitatifs du confort thermique extérieur	187
2.3.2	Les critères quantitatifs du confort par rapport au vent	226
2.3.3	Les critères quantitatifs du confort respiratoire à l'extérieur	244
2.3.4	Les critères quantitatifs du confort acoustique à l'extérieur	246
2.3.5	Les critères quantitatifs du confort visuel à l'extérieur	253
2.3.6	Les critères quantitatifs du confort par rapport aux intempéries	269
2.4	Nouvelle méthode d'évaluation du confort à l'extérieur	273
3.	Etude du microclimat	278
3.1	Paramètres microclimatiques	278
3.1.1	Les différents types de climats	280
3.1.2	Les données climatiques disponibles	282
3.1.3	Les éléments qui déterminent le microclimat d'un site	284
3.2	Spécificités du microclimat urbain	320
3.2.1	La pollution urbaine	322
3.2.2	L'effet d'îlot de chaleur urbain	337
3.2.3	La modification du rayonnement solaire en ville	350
3.2.4	La modification des mouvements d'air en milieu urbain	378
3.2.5	La modification de l'humidité et des précipitations en milieu urbain	405
4.	Analyse et quantification de l'influence des bâtiments sur l'écoulement du vent	408
4.1	Simulations CFD	408
4.1.1	Les paramètres de simulation	408
4.1.2	Les différents modèles de turbulence	412
4.2	Validation de FLUENT comme outil d'étude du vent autour des bâtiments	417
4.2.1	Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un bâtiment isolé	417
4.2.2	Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un groupe de bâtiments	428
4.2.3	Validation de FLUENT pour l'étude du vent dans un tissu urbain dense	433
4.3	Règles d'élaboration d'une simulation CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments	449

4.4 Outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des bâtiments	454
4.4.1 L'effet de coin	456
4.4.2 L'effet de cisaillement	469
4.4.3 L'effet de passage sous immeuble	472
4.4.4 Le rouleau tourbillonnaire	478
4.4.5 L'effet de barre	482
4.4.6 L'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé	484
4.4.7 L'effet Venturi	486
4.4.8 L'effet Wise	490
4.4.9 L'effet de double coin	495
4.4.10 L'effet de bâtiments en quinconce	501
4.4.11 L'effet de canalisation linéaire	504
4.4.12 L'effet de maille	505
4.4.13 L'effet d'écran linéaire	508
4.4.14 L'effet de pyramide	510
4.4.15 L'effet de la végétation	511
4.4.16 L'effet de masque urbain	511
4.4.17 L'effet canyon	515
4.4.18 L'écoulement du vent autour d'un bâtiment élevé implanté en milieu urbain dense	518
4.4.19 Les effets du vent au sein de grands ensembles de bâtiments élevés.	521
5. Etude de l'ambiance sonore à l'extérieur des bâtiments	523
5.1 Paramètres acoustiques	523
5.1.1 Les émissions de bruit en milieu urbain	524
5.1.2 La propagation du bruit en milieu urbain	525
5.1.3 Les dispositifs de correction acoustique	538
5.2 Méthodes d'évaluation des ambiances sonores	542
6. Elaboration de règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité	558
6.1 La planification urbaine	559
6.2 La morphologie urbaine	569
Conclusion	599
Prospectives	
Le mot de la fin	
Bibliographie	622

Introduction

« La relation existant entre l'humanité et la nature doit être faite de respect et d'amour, non de domination. » René Dubos

Ce chapitre d'introduction commence par une description générale du contexte urbain et politique dans lequel cette thèse de doctorat s'inscrit. Ensuite, nous y présentons les enjeux et les objectifs de notre recherche doctorale ainsi que la méthodologie utilisée et l'originalité de ce travail dans le contexte de la recherche actuelle. Ce chapitre comprend enfin la description des thèmes abordés et la structure de cette thèse.

La qualité de l'environnement urbain est une expression de l'évolution d'une civilisation. Les villes ont été, depuis la fin du Moyen Age, des pôles de développement économique, de transformation culturelle et d'émancipation sociale de notre société. Aujourd'hui, nos urbanisations rassemblent la majorité de la population et constituent les pôles de développement les plus importants de notre civilisation.

Cependant, en ce début de XXI^{ème} siècle, il est temps d'envisager très sérieusement l'avenir de nos villes. L'urbanisation croissante du monde et le contexte actuel de la globalisation ont entraîné des mutations profondes au sein de nos villes, générant des déséquilibres environnementaux, sociaux, politiques et économiques. Actuellement, nos urbanisations représentent fondamentalement les lieux où se jouent des enjeux planétaires cruciaux pour l'avenir de l'humanité, tels que les changements climatiques, la pénurie d'eau, la dégradation de l'environnement, l'exclusion sociale, la pauvreté, la criminalité, la mauvaise utilisation des sols, l'augmentation de la pollution, l'épuisement des ressources naturelles, une vulnérabilité croissante face aux catastrophes naturelles et technologiques, ... Le développement durable des villes est devenu un enjeu critique pour notre planète.

Cette thèse s'inscrit dans la recherche de nouveaux modes de conception de notre espace habité pour assurer le développement durable des villes.

Aujourd'hui, l'espace public urbain est un enjeu primordial du développement social, environnemental et économique des villes belges et européennes. Il joue un rôle essentiel dans notre société (tissu social, style de vie, participation des citoyens,...). Il a des effets indéniables sur le bien-être, autant que la santé de la population (nuisances sonores, accidents de la route,...), la qualité de l'environnement (pollution de l'air, dégradation de la nature,...) ainsi que sur le développement économique (consommation d'énergie, ...). Ainsi, concevoir des espaces publics urbains de qualité est un des fondements de la création d'un urbanisme durable.

Cette thèse de doctorat vise à promouvoir un nouveau rapport de la société à l'espace public urbain, à travers la création d'ambiances urbaines de qualité, confortables et adaptées aux conditions climatiques locales.

L'importance stratégique de cette recherche pour le développement durable des urbanisations belges et européennes provient d'abord de ce qu'elle traite du cœur même de la ville, de ce qui la caractérise en premier lieu et constitue son problème actuel majeur : l'espace public urbain. En effet, l'espace public a joué un rôle

important dans l'élaboration de la ville européenne et de ses structures sociales, culturelles, politiques et économiques. Toutefois, l'avènement de l'automobile et la privatisation de nombreuses fonctions publiques font qu'aujourd'hui l'espace public est davantage synonyme de nuisances que de bien-être. L'étalement urbain actuel implique une consommation considérable du territoire et une perte des valeurs fondamentales qui constituaient nos paysages bâtis. Face aux processus de dispersion de l'urbanisation et de désinvestissement par rapport à l'espace public, il est important de revaloriser les espaces publics urbains, non seulement dans les centres anciens mais aussi dans les proches banlieues, les quartiers en difficulté, les friches urbaines, ... Si aujourd'hui, certains centres urbains touristiques redonnent de la vitalité à leurs réseaux de rues et de places, les extensions contemporaines restent généralement des lieux où la voirie et le rond point ont remplacé la rue et la place publique. Il est donc essentiel de promouvoir la réalisation d'espaces publics durables dans tous les quartiers et particulièrement dans ceux où la présence d'espaces interstitiels est prédominante.

Par ailleurs, cette thèse de doctorat, développée dans le contexte politique belge, est en accord avec **les cinq principes du développement durable choisis par le Bureau Fédéral du Plan (BFP) en juin 2000** comme les plus novateurs, caractéristiques de la notion de développement durable définie en 1992 à Rio et synthétiques de l'ensemble des 27 principes de la déclaration de Rio, à savoir (BFP 2000):

- le principe d'intégration des composants du développement durable,
- le principe de double équité, intra et intergénérationnelle,
- le principe de précaution et de reconnaissance des incertitudes scientifiques,
- le principe de responsabilité commune mais différenciée,
- le principe de participation des citoyens.

Le principe d'intégration des composantes du développement durable consiste à prendre en compte et à relier la composante environnementale (c'est-à-dire la qualité de l'environnement, y compris les réserves des ressources naturelles, la qualité de l'air, l'eau, la biodiversité, ...), la composante sociale (c'est-à-dire le bien-être et la santé de la population, les rapports qu'une société propose entre ses membres, ...), la composante économique (c'est-à-dire le capital physique, tels que les infrastructures ou l'utilisation du sol, et la rentabilité financière des interventions) et la composante politique (c'est-à-dire les lois, les règlements et les valeurs qui permettent d'organiser les modes de vivre ensemble dans une société). Les enjeux et les objectifs de cette thèse couvrent ces différentes composantes du développement durable. Cette recherche porte sur la qualité des espaces publics urbains, à travers des aspects aussi divers que la densité construite, les consommations d'énergie, les modes de déplacements, l'équité sociale, la cohésion sociale, le confort des citoyens, le microclimat, la qualité de l'air, le niveau de bruit, la biodiversité, le cycle de l'eau, ... Enfin, elle s'inscrit dans le contexte politique belge actuel et devrait participer à l'évolution de ses politiques d'aménagement du territoire.

Le second principe du développement durable défini par le Bureau Fédéral du Plan est le principe de double équité, intra et intergénérationnelle. Améliorer la qualité des espaces publics urbains, c'est offrir des espaces de vie commune agréables et accessibles à tous. Un environnement convivial ainsi qu'une qualité de vie et de santé offerte à tous les citoyens sont essentiels à l'équilibre socio-économique de la société d'aujourd'hui. Cette thèse s'inscrit donc par essence dans une recherche

d'équité intragénérationnelle. La manière dont cette thèse traite l'espace public en intégrant des aspects aussi variés que la densité urbaine, la mobilité et la biodiversité, élargit les bénéfices attendus aux générations futures. Rappelons notamment que la consommation croissante d'énergie pose des problèmes environnementaux et de santé en Europe comme dans les pays en voie de développement et que les dégâts engendrés seront transmis aux générations futures. Ainsi, promouvoir des urbanisations respectueuses de l'environnement naturel et construit par l'aménagement d'espaces publics durables est un gage d'équité intra et intergénérationnelle.

Le troisième principe du développement durable défini par le Bureau Fédéral du Plan est le principe de précaution et de reconnaissance des incertitudes scientifiques. Le principe de précaution s'applique particulièrement à l'urbanisme car les risques hypothétiques de toute intervention sur notre milieu sont d'autant plus difficiles à évaluer qu'ils engagent des échelles spatiales et temporelles importantes, ce qui est évidemment le cas des décisions d'urbanisme. Cette recherche doctorale consiste à développer un potentiel scientifique et des outils pratiques dans différents domaines stratégiquement importants pour le développement durable des villes belges et européennes. Elle précise et réduit les incertitudes scientifiques actuelles et elle souligne les besoins futurs en termes de connaissances sur le milieu urbain. Les outils développés dans cette recherche aideront les décideurs à prendre en considération les mesures de précaution nécessaires au bien-être actuel et futur de la population.

Le quatrième principe du développement durable défini par le Bureau Fédéral du Plan est le principe de responsabilité commune mais différenciée. Ce principe souligne notre responsabilité à tous à travers nos modes de vie individuels et collectifs dans le développement d'une humanité durable. Ce principe ajoute aussi l'idée que, si la responsabilité par rapport aux enjeux du développement durable est commune à tous les êtres humains, elle n'est toutefois pas la même dans un pays développé que dans un pays en voie de développement. Les nombreux exemples européens choisis pour illustrer cette thèse de doctorat permettront de sensibiliser les utilisateurs des espaces publics belges et européens à leur responsabilité en tant que citoyen d'un pays développé, notamment dans leurs choix de déplacement et l'implantation de leurs logements (densité urbaine,...). C'est pourquoi cette thèse a été rédigée dans le but de toucher les différents publics concernés, non seulement les décideurs et les concepteurs de projets urbains mais aussi le grand public.

Le cinquième principe du développement durable défini par le Bureau Fédéral du Plan est le principe de participation des citoyens. La participation citoyenne localise les décisions à l'échelle des citoyens, facilite la prise en compte des particularités locales et l'appropriation des choix devenus collectifs. Elle garantit la pluralité des solutions et des points de vue. La participation citoyenne est également abordée dans cette thèse sur les espaces publics urbains et elle y est illustrée à partir de plusieurs exemples concrets. Le principe de participation consiste à intégrer les enjeux et les limites de l'échelle globale avec les nécessités du contexte local. L'étude des ambiances urbaines se situe par définition à l'intersection des enjeux globaux et locaux du développement durable des villes.

Cette thèse doctorale répond donc véritablement au questionnement politique actuel sur le développement durable puisqu'elle correspond aux cinq principes synthétiques du développement durable définis par le Bureau Fédéral du Plan.

Les enjeux de cette thèse de doctorat

Les ambiances urbaines participent au développement social, environnemental et économique de nos urbanisations.

Il existe de nombreuses influences entre la morphologie urbaine, l'ambiance d'un espace public et le comportement des piétons dans ce lieu. L'espace public urbain ne peut en aucun cas être considéré comme un espace résiduel entre les bâtiments. C'est un espace fondamental pour la vie sociale d'une ville de par ses capacités à générer des rencontres et à favoriser une mixité de la population. De plus, des espaces publics de qualité participent activement à la construction d'une équité sociale puisqu'il s'agit de lieux de vie offerts à tous les citoyens, ce qui rejoint l'enjeu social du développement durable.

L'urbanisme peut être un agent destructeur des réseaux sociaux, c'est le cas dans les projets de rénovation urbaine sans nuance mais il peut à l'inverse entretenir les possibilités d'une vie de quartier pleine de richesses. Ceci ne signifie pas que l'urbanisme induit la présence ou l'absence de cohésion sociale : ce sont les individus eux-mêmes qui choisissent de créer un lien social mais l'urbanisme joue un rôle par rapport aux possibilités de choix qui s'offrent à la population. La convivialité est une des qualités essentielles d'un espace public durable car elle favorise l'utilisation des espaces publics ainsi que les rencontres et les échanges qui peuvent s'y produire. Cette recherche se base sur l'hypothèse qu'une ville durable offre aux citoyens des espaces publics (places, rues, îlots, ...) réellement appropriables par ceux-ci. Ainsi, il est indispensable que l'espace public urbain soit confortable et attrayant parce que c'est le lieu où les valeurs sociales et collectives se construisent. Tenir compte de l'espace public lors de la conception des bâtiments en zone urbaine améliore l'habitabilité des villes.

La conception et la modification des formes urbaines induisent des transformations profondes et à long terme de l'environnement, dont le microclimat est un des aspects fondamentaux. Les villes modernes ont été fortement influencées par des intérêts économiques à court terme et des valeurs technologiques. La qualité environnementale de l'espace laissé entre les bâtiments a rarement été prise en compte, ce qui génère souvent un inconfort intolérable pour les piétons. En outre, ces espaces modernes inadaptés à notre climat créent des problèmes globaux importants pour notre planète tels que l'augmentation de la pollution et les changements climatiques qu'elle induit. A l'heure actuelle, il est temps de changer les critères de sélection des projets urbains. Le développement durable des villes dépend en grande partie de la capacité des urbanistes à offrir des espaces extérieurs urbains à haute qualité environnementale, qui enrichissent l'expérience de vivre en ville. Le microclimat d'un lieu est une clé de conception pour des ambiances architecturales et urbaines de qualité.

Une conception urbaine basée sur l'étude du microclimat peut non seulement améliorer le confort extérieur en ville mais aussi la qualité intérieure des bâtiments ainsi que diminuer leurs consommations énergétiques. Ainsi, la ventilation d'une place peut y réduire les risques de pollution de l'air mais aussi accroître la qualité de l'air dans les édifices qui la jouxtent et offrir la possibilité de remplacer un système de climatisation éventuel par une ventilation naturelle des locaux. Le microclimat fixe d'une certaine manière les limites pour la construction d'une architecture durable et influence également le comportement des piétons dans les espaces publics. L'objectif d'une conception microclimatique est de créer des

espaces publics et des bâtiments plus confortables et plus sains pour les habitants mais aussi plus autonomes vis à vis des techniques impliquant la consommation d'énergies fossiles (transport, climatisation, éclairage, ...). Cette démarche qui met l'accent sur la conception de l'architecture et de l'urbanisme et non sur l'utilisation de technologies est bien sûr exigeante pour les concepteurs mais très bénéfique pour les futurs utilisateurs.

La morphologie urbaine influence fortement l'économie locale par son action sur nos modes d'habiter et sur les possibilités de rentabilité des infrastructures (transports en commun, routes, réseaux d'énergie,...). Le développement économique durable d'une région nécessite donc de prendre en compte la gestion de l'aménagement de ce territoire, notamment en favorisant une certaine densité construite et la mixité des fonctions (logement, travail, services, loisirs,...). Ainsi, pour une économie durable, il est nécessaire de limiter l'étalement urbain et de valoriser la vie urbaine pour attirer de nouveaux habitants en ville. La qualité des ambiances urbaines est donc un des éléments qui participe à promouvoir une économie urbaine rentable.

Il y a un optimum à chercher pour la densité des villes. De manière évidente, une utilisation plus intense du territoire et un partage des infrastructures (espaces publics, énergie, eau, transport public, ...) réduit l'énergie associée à sa construction et sa maintenance et bénéficie d'une économie d'échelle par rapport à une configuration urbaine dispersée. Cependant, des densités trop importantes créent des difficultés pour conserver un bon niveau de bien-être. La prise en compte de la santé de l'homme dans les processus de décision est un aspect essentiel du développement durable. Or, la santé des citoyens dépend dans une large mesure de la création d'ambiances urbaines confortables valorisant des modes de vie sains (marche à pied, éclairage naturel des bâtiments,...). C'est ainsi que la conception d'ambiances urbaines de qualité devient un élément charnière entre l'enjeu local d'assurer le bien-être des habitants et l'enjeu global de densifier le tissu urbain.

Ces différents points de vue prouvent l'importance indéniable de la qualité des ambiances urbaines pour le développement durable des villes. Concevoir des ambiances urbaines de qualité est un des fondements de la création d'un urbanisme durable.

Cependant, il n'existe pas aujourd'hui de théorie cohérente pour la conception d'ambiances urbaines de qualité. Notons l'absence d'une définition approfondie des critères de durabilité des espaces publics urbains, le manque d'informations accessibles aux concepteurs de projets urbains sur les interactions entre le climat et la ville, le manque crucial d'études sur les critères qui déterminent le confort à l'extérieur et l'absence d'une stratégie de conception microclimatique urbaine. Il s'agit de lacunes à combler de toute urgence pour aider les architectes et les urbanistes à concevoir des ambiances urbaines de qualité.

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat changer au rythme de l'activité humaine. Les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui modifient le microclimat urbain. En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesses de vent plus faibles mais turbulences plus élevées, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air,... Les paramètres climatiques d'un site urbain présentent généralement de

substantielles modifications par rapport aux moyennes climatiques relevées dans les stations météorologiques. Il est donc souhaitable que les architectes et les urbanistes prennent en compte les valeurs locales du microclimat car elles peuvent induire des différences significatives pour l'évaluation du confort à l'intérieur comme à l'extérieur ainsi que des consommations d'énergie des bâtiments. Le microclimat urbain a une logique propre qui devrait enrichir tout projet.

Si, à l'heure actuelle, les seules données météorologiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site dégagé, comment tenir compte de l'effet de l'urbanisation dans notre conception architecturale? Comment prédire et simuler ces effets? Il est indispensable de pouvoir évaluer le microclimat local d'un lieu, spécialement lorsqu'il s'agit d'un milieu urbain.

Les outils de simulation qui permettent d'évaluer précisément le microclimat urbain sont des développements récents. L'architecture du passé était basée sur le transfert d'une tradition de construction et sur un apprentissage par des méthodes empiriques. Ces nouvelles techniques d'évaluation du microclimat nous permettent d'analyser scientifiquement les paramètres en jeu et de fixer des limites pour une conception moderne respectueuse de l'homme et de son environnement. Cependant, les technologies de pointe qui permettent aujourd'hui de simuler le microclimat urbain sont très complexes et demandent aux concepteurs un investissement trop important en temps et en argent pour la majorité des projets.

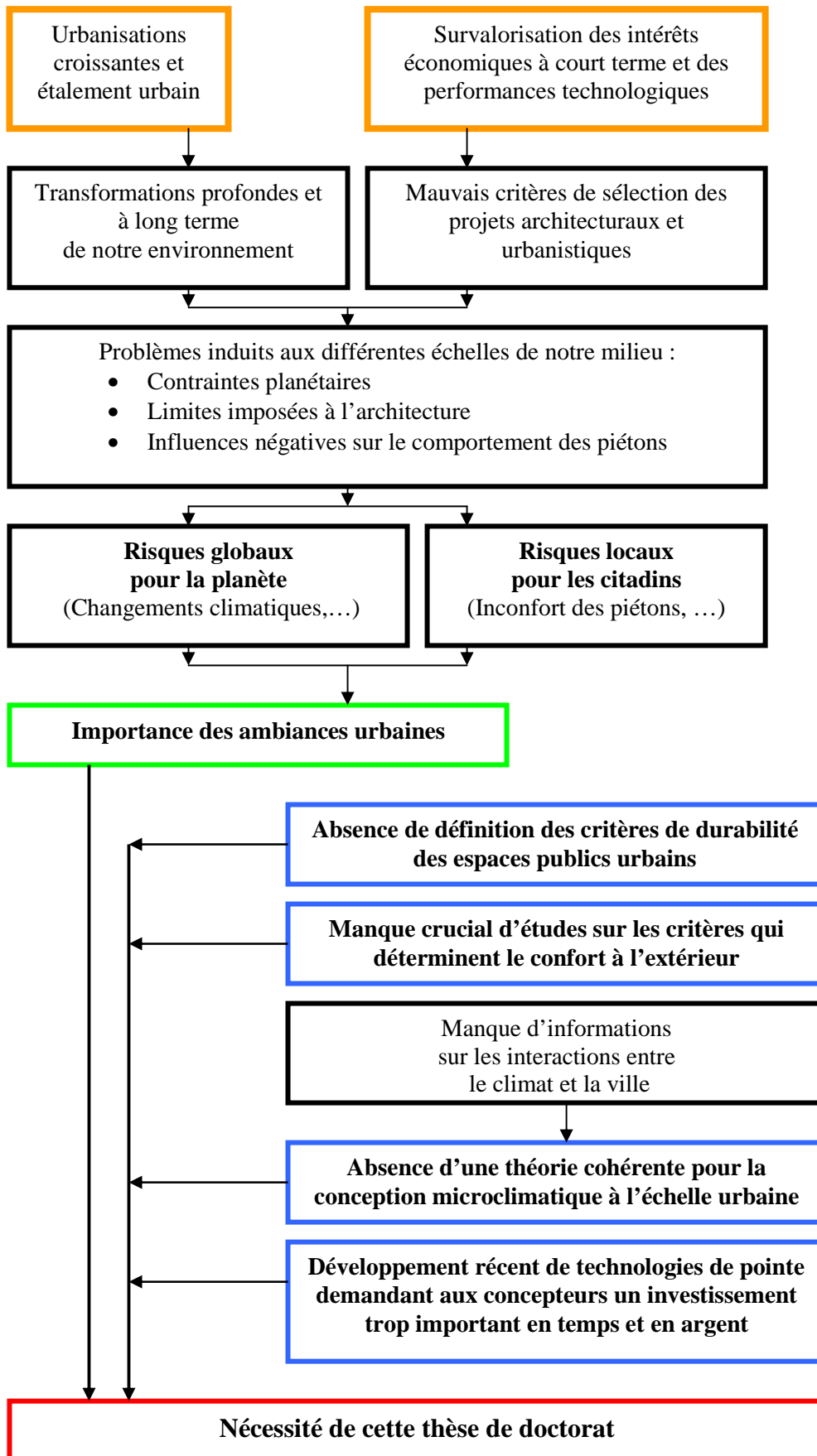
C'est ainsi qu'est né notre projet d'offrir aux architectes et aux urbanistes des outils pratiques simplifiés pour intégrer efficacement l'aspect microclimatique à leurs projets, dès la phase de conception. Il s'agit donc de tenter de combler le fossé actuel entre les technologies sophistiquées de simulations du microclimat urbain, complexes d'usage et coûteuses en temps d'utilisation et en argent, et la pratique du projet architectural.

La réhabilitation d'un espace extérieur existant ou la conception d'un nouvel espace public peuvent offrir la possibilité de créer des ambiances urbaines de qualité. Les solutions possibles aux problèmes spécifiques auxquels fait face un espace public déterminé sont illimitées et dépendent fortement de la morphologie urbaine et de son microclimat. Mais il y a un certain nombre de considérations que le concepteur doit absolument prendre en compte de manière à proposer avec succès un environnement attractif et confortable ; ce sont ces principes que nous développons dans cette thèse. Notre but est de donner aux concepteurs et aux décideurs de projets urbains la stratégie et les outils pratiques pour concevoir des ambiances urbaines de qualité du point de vue architectural, microclimatique et acoustique.

Signalons une étude réalisée en Angleterre par Mc Cartney et Matsika sur l'enseignement de l'architecture : elle montre clairement que l'enseignement et l'explication de l'usage de l'outil graphique et stratégique qu'est la charte bioclimatique d'Olgyay transforme réellement l'approche du projet des étudiants architectes qui y insèrent une réflexion climatique avec une certaine facilité (Mc Cartney & Matsika 2004). Il nous semble donc que les outils développés dans ce doctorat auront un impact concret évident pour l'enseignement futur de l'architecture.

Cet ensemble d'enjeux prouve la nécessité d'effectuer des recherches approfondies sur la conception d'ambiances urbaines de qualité et particulièrement sur la conception microclimatique des espaces publics.

Le schéma ci-dessous synthétise les enjeux de cette thèse de doctorat.



Les objectifs de cette thèse de doctorat

Face à la complexité de la ville, un premier but de ce travail est d'améliorer et d'étendre la connaissance scientifique actuelle dans trois domaines:

- les espaces publics collectifs en ville,
- le microclimat en milieu urbain,
- le confort des personnes à l'extérieur des bâtiments.

A ce premier objectif, se mêle immédiatement une autre ambition : promouvoir une conception architecturale et urbaine respectueuse de l'homme (par la solidarité, l'égalité des chances, l'échelle humaine, la symbolique,...) et de l'environnement (par les équilibres écologiques, la limitation des nuisances environnementales,...).

Le but fondamental de cette recherche est de favoriser le développement d'espaces publics durables. Son exploration sous-tend une tentative d'énonciation d'une philosophie de conception de notre cadre bâti. A travers cette étude, notre but est de favoriser la création de liens entre l'homme, son environnement et les différentes échelles de l'habiter, grâce à la participation à une prise de conscience collective, qui ne peut se réaliser que par la sensibilisation du public, par l'information des décideurs politiques et par la formation des concepteurs de projets urbains.

La question essentielle à laquelle cette thèse de doctorat tente de répondre est comment générer des conditions confortables dans les espaces publics urbains, tout en favorisant le développement durable des villes.

Les effets positifs du confort des personnes en ville sont nombreux. Citons:

- l'amélioration de la qualité de vie dans les espaces publics collectifs en ville (équité sociale, santé ...),
- l'accroissement de l'utilisation des places urbaines (rencontres, mixité de la population, ...)
- la diminution des consommations d'énergie liées à l'utilisation de l'espace public (circulation,...),
- des effets bénéfiques pour la planète (valorisation de l'image des villes,...)
- la limitation des nuisances environnementales (réduction de la pollution atmosphérique,...).
- ...

L'être humain dans toute sa complexité est au centre de la question du développement durable. Cette recherche a également pour objectif de souligner l'importance du point de vue humain et de son expérience corporelle pour qu'un espace public puisse être approprié. L'expérience sensible préexiste toujours à notre interprétation abstraite et donc à notre capacité à donner sens à un espace.

Nous désirons renouer avec l'échelle du corps et avec l'échelle du milieu naturel. Sur ce sujet, laissons parler Françoise Choay : *«Le pas vers un espace différent-emblème d'une société différente- requiert l'intégration laborieuse et subversive de paramètres qui s'appellent, en particulier, le corps, la nature, la technique : corps à réapproprier et à réintégrer dans l'espace de ses parcours ; nature à réinvestir et à réapprendre, par le corps précisément ; technique à démystifier, à affranchir des idéologies qui l'encensent ou la condamnent sans nuance ni alternative, alors que, instrument fondamental d'une nouvelle édification, ses innovations doivent être exposées à toutes les modulations et, en particulier, ouvertes aux acquis de la tradition comme au travail prospectif de la science. »* (Choay 1980)

Cette recherche a pour objectif pratique d'offrir aux concepteurs et aux décideurs des projets urbains les outils méthodologiques et techniques qui leur permettent d'évaluer rapidement et d'améliorer la qualité d'ambiances urbaines réelles ou projetées du point de vue architectural, microclimatique et acoustique.

Une attention particulière est centrée sur la conception microclimatique des espaces publics urbains. Comprendre la richesse que recèlent les facteurs microclimatiques et leurs implications sur le confort humain ouvre de nouvelles possibilités pour la conception et l'aménagement d'espaces publics de qualité. Mais il ne suffit pas de conscientiser les urbanistes et les architectes à l'étude du microclimat urbain, encore faut-il leur donner les moyens d'intégrer cette question dans leur processus de conception. Ce travail de thèse a pour objectif **l'élaboration d'une stratégie et de conseils pratiques pour l'intégration du microclimat dans le processus de conception et de rénovation des espaces publics en site urbain.**

Enfin, cette thèse a été écrite dans le but de toucher l'ensemble des acteurs intervenant dans le processus de conception et d'appropriation des espaces publics :

- les autorités locales qui développent des plans urbanistiques ou environnementaux pour leur commune ou leur ville,
- les architectes qui désirent concevoir des bâtiments et des espaces publics,
- les architectes paysagers qui désirent améliorer les qualités environnementales, microclimatiques et écologiques d'un site.
- les politiciens qui mettent concrètement en place les normes et prescriptions pour l'environnement urbain.
- les chercheurs dans ce domaine ou des domaines connexes qui désirent utiliser les études déjà réalisées pour comparer ou compléter leurs résultats.
- les citoyens investis dans un projet de construction ou intéressés par les possibilités concrètes de participer à des modes de vie durables.

Signalons que cette thèse a fait l'objet d'un travail de rédaction important. Elle a été largement illustrée par des exemples concrets qui montrent de nombreux espaces publics belges et européens, afin d'en rendre la lecture plus aisée pour les différents publics concernés.

Ces différents objectifs montrent clairement que cette étude peut apporter de nombreux impacts positifs au développement environnemental, économique et social des urbanisations européennes.

La méthode de travail

La conception d'ambiances urbaines de qualité est un processus créatif qui génère des solutions appropriées au niveau architectural et technique. Toute étude de conception urbaine doit intégrer ces deux niveaux d'action, dès l'esquisse d'un projet. Du point de vue microclimatique, la conception artistique requiert la connaissance de certains phénomènes physiques, constructifs et ergonomiques basés sur un savoir historique, traditionnel, intégrant les données naturelles du site et de son climat. Le point de vue technique, lui, consiste à étudier et utiliser les développements scientifiques actuels pour une meilleure maîtrise de la conception des ambiances climatiques, notamment grâce aux technologies de simulation des paramètres climatiques.

L'approche technique seule ne permet pas de fonder un projet architectural car elle ignore les fondements culturels et psychologiques indispensables pour créer une architecture de qualité. C'est pourquoi ce travail de doctorat utilise deux méthodes de recherche :

- une réflexion basée sur une étude bibliographique étendue. Cette recherche se fonde sur une approche scientifique rigoureuse.
- des simulations informatiques du vent autour des bâtiments. Cette approche se base sur un outil de pointe : FLUENT, logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics).

Cette thèse se fonde sur une approche fondamentalement pluridisciplinaire. Nous avons la certitude que la question du développement durable de l'humanité nécessite une transformation des méthodes de recherche et une plus grande interdisciplinarité. Notre approche consiste à interroger les multiples visages de la connaissance humaine. Cette thèse présente une réflexion basée sur une vaste étude bibliographique, s'étendant à des disciplines aussi variées que l'architecture, la philosophie, la sociologie, la psychologie, la physiologie humaine et la physique ainsi que des domaines plus spécifiques tels que la thermique, l'éclairage, la mécanique des fluides ou l'acoustique.

Les développements urbains dépendent de nombreux spécialistes qui ont généralement peu de temps pour confronter leurs problématiques. Par exemple, les experts en acoustique limitent l'étude du confort extérieur à son point de vue sonore. Nous avons choisi d'étudier le confort des piétons dans les espaces urbains ouverts à travers la confrontation des points de vue des différentes disciplines concernées. Notre recherche est réellement multidisciplinaire.

En outre, le temps est venu de tenir compte de l'importance fondamentale de la notion de qualité et de son rôle dans la production des phénomènes quantitatifs observables. Cette étude utilise deux langages complémentaires : celui de la raison à travers l'étude d'expériences scientifiques et celui de la signification à travers l'étude de différents types d'interprétations signifiantes du monde : l'architecture, la psychologie, ... Utilisant ces deux langages, on peut tenter de répondre au « comment » sans jamais négliger le « pourquoi ».

Chaque partie de cette recherche est étudiée dans une démarche holistique afin de déterminer des critères de conception aussi bien qualitatifs que quantitatifs. Ainsi, l'étude sur le confort extérieur intègre les points de vue physiologiques et psychologiques des piétons afin de créer une architecture plus humaine et mieux reliée à son milieu. Notre nouvelle méthode d'évaluation du confort à l'extérieur est née du croisement entre les aspects scientifiques et techniques du confort extérieur et ses aspects liés à la perception et aux comportements des usagers.

Il est important de souligner la qualité de cette démarche holistique, qui replace en permanence cette recherche au sein de la complexité du fonctionnement urbain, tout en gardant un point de vue scientifique et en s'attaquant aux difficultés réelles des simulations numériques réalisées.

Le caractère innovant

Le concept de « développement durable » est sans cesse utilisé à l'heure actuelle mais peu de centres de recherche se sont penchés sur la définition d'un urbanisme durable au-delà de la question de la mobilité. L'importance de l'espace public urbain comme enjeu du développement durable et la définition des critères de conception d'un espace public durable sont des nouveaux thèmes de recherches.

Si la conception d'un bâtiment du point de vue bioclimatique a été largement analysée, l'influence de la forme urbaine sur le microclimat extérieur est en général négligée. De plus, un de ses paramètres fondamentaux, le vent, est encore très peu étudié. Il y a donc actuellement un manque crucial d'informations et d'outils faciles et rapides permettant aux concepteurs de projets urbains d'intégrer la préoccupation microclimatique.

Enfin, la majorité des études actuelles sur le confort portent uniquement sur les conditions intérieures et les quelques recherches qui ont été abordées pour étendre les critères de confort à l'extérieur sont très souvent des approches purement physiologiques. Il est toutefois évident qu'on ne peut pas évaluer de manière identique le confort à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Tout d'abord, les deux paramètres climatiques principaux à l'extérieur sont le vent et le rayonnement solaire direct, tous deux exclus des études réalisées à l'intérieur. De plus, le comportement des personnes face aux conditions environnantes est très différent à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

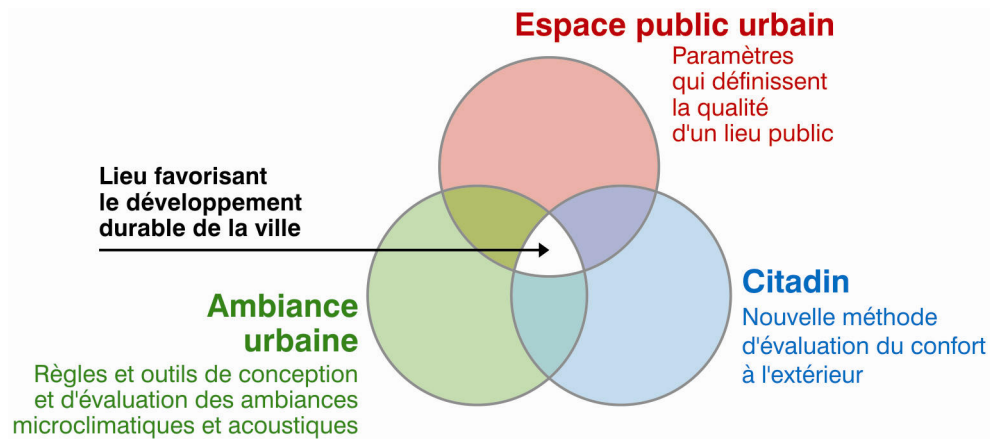
Cette thèse de doctorat est donc fondamentalement innovante dans le contexte de la recherche d'aujourd'hui. En outre, elle enrichit de manière évidente la connaissance des problématiques urbaines actuelles en Belgique et en Europe. Il faut noter que des problèmes typiquement microclimatiques sont visibles dans la plupart de nos urbanisations; citons, par exemple, les rafales de vent qui atteignent les piétons aux environs de nombreux immeubles-tours.

Thèmes et structure de cette thèse de doctorat

Cette thèse développe des méthodes et des outils d'aide à la création d'ambiances urbaines de qualité, confortables et adaptées aux conditions climatiques locales. Ses trois orientations privilégiées sont la qualité de la conception architecturale urbaine, la question du confort des personnes à l'extérieur et le microclimat urbain.

L'échelle de la réflexion de cette recherche va du territoire au bâtiment mais l'espace public urbain et ses deux composants majeurs, la rue et la place, y ont une place prioritaire. L'espace public urbain est une échelle d'intervention urbaine spécialement pertinente pour traiter de la question du développement durable. En effet, c'est à cette échelle que peuvent se résoudre de nombreux problèmes écologiques et sociaux ainsi que la mise en oeuvre d'une démarche participative.

Cette thèse de doctorat est centrée sur l'étude des multiples interactions entre la morphologie du tissu urbain, les ambiances urbaines et les citoyens. Le schéma ci-dessous représente les différents thèmes abordés par cette recherche doctorale.



La première partie de ce doctorat étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour promouvoir le développement durable de nos villes. Cette étude aboutit à la définition d'un espace public durable, basée sur trois qualités fondamentales : la contextualité, la coexistence et la cohérence.

Dans une seconde partie, cette thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics. Notre approche innovante du confort à l'extérieur consiste à regrouper les points de vue physiologique et psychologique. Cette étude aboutit à l'élaboration d'une méthode d'évaluation du confort à l'extérieur, regroupant des critères quantitatifs et des critères qualitatifs.

La troisième partie de ce doctorat étudie les multiples interactions entre la morphologie urbaine et les ambiances microclimatiques et acoustiques des lieux publics. Cette étude aboutit à l'élaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception des ambiances urbaines. L'étude du vent autour des bâtiments y est particulièrement développée. Cette section comprend une validation du logiciel FLUENT pour l'étude du confort au vent au niveau piéton ainsi que l'élaboration d'outils graphiques quantitatifs d'évaluation des niveaux d'inconfort au vent autour des bâtiments.

Ainsi, grâce à la mise en commun de ces trois directions de recherche, cette thèse de doctorat analyse la thématique des ambiances urbaines de manière globale et promeut une architecture qui enrichit la vie humaine tout en étant respectueuse de la planète.

1. Elaboration d'une définition d'un espace public durable

« Le meilleur modèle de développement durable, c'est la diversité du vivant, depuis 4 milliards d'années. » Robert Barbault.

Cette première partie aborde le concept de développement durable. Après une courte introduction, cette section met en évidence les modes d'urbanisations insoutenables les plus répandus à l'heure actuelle et leurs conséquences désastreuses du point de vue environnemental, social, culturel, politique et économique. Ensuite, nous y développons une définition de la durabilité des espaces publics à partir de trois principes fondamentaux : la contextualité, la coexistence et la cohérence. Cette stratégie de conception et de rénovation des espaces publics est largement illustrée par de nombreux exemples concrets d'espaces publics essentiellement belges ou européens.

1.1 Développement durable des villes

1.1.1 Le concept de « développement durable »

En 1983, les Nations-Unies décident de créer une commission d'experts internationaux pour analyser les détériorations de l'environnement humain et des ressources naturelles de notre planète ainsi que leurs conséquences sur le plan économique et social. Le rapport de cette commission, « Our common futur », publié en 1987 et plus connu sous le nom de rapport Brundtland (WCED 1987), constate l'insoutenabilité de l'évolution contemporaine du développement mondial du point de vue environnemental, social, économique, culturel et politique. Ce rapport postule aussi l'interdépendance de ces différents domaines de développement et il propose d'orienter les forces internationales vers un nouveau type d'évolution planétaire: le développement durable.

Le rapport Brundtland prouve que le modèle de développement occidental pratiqué depuis quelques décennies engendre des dégâts environnementaux et socio-culturels considérables. Ces problèmes ne se limitent pas à diminuer notre qualité de vie mais, en outre, hypothèquent gravement le potentiel des générations futures. Chacun de nous doit dès lors reconnaître la part de responsabilité qu'il prend, jour après jour, dans l'évolution de notre environnement (dont les composantes naturelles, construites et humaines ont toutes leur importance). Il est temps que nous nous sentions plus solidaires dans un développement en meilleure harmonie avec notre héritage naturel et culturel. L'inaction n'est pas neutre, c'est une politique à haut risque dont on oublie de prendre en compte les conséquences dans les arguments de décision.

Les projets architecturaux et urbanistiques modifient fortement nos environnements physiques, sociaux, culturels et économiques. Les architectes et les urbanistes ont donc un rôle important à jouer pour favoriser des conditions de vie qui contribuent

à la santé, au bien-être et au développement durable de l'humanité. Il nous semble dès lors indispensable de repositionner nos choix de conception urbaine dans le cadre du développement durable.

En 1990, à peine trois ans après le rapport Brundtland, la Commission Européenne publie le *Livre vert sur l'environnement urbain* (CEE, 1990). Ce livre réalise le premier diagnostic urbain à l'échelle de la communauté européenne. Il met l'accent sur le caractère commun des problèmes auxquels les villes sont confrontées. Malheureusement, quinze ans plus tard, nous constatons que la situation urbaine a encore très peu évolué...

La définition communément admise du développement durable qui figure dans le rapport Brundtland est la suivante: «*Le développement durable est le développement qui satisfait les besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de la possibilité de satisfaire leurs propres besoins.*» (WCED 1988).

Le développement durable est donc un concept beaucoup plus vaste que la protection de l'environnement. Il pose la question de la qualité de la vie, du développement de l'humanité (qui est fondamentalement éthique et pas seulement financier), de l'équité sociale, de la transmission d'un héritage naturel et culturel. Il suppose que l'on se préoccupe des générations actuelles et futures ainsi que de la salubrité et de l'intégrité du milieu naturel à long terme. Se situer dans une perspective de développement durable nécessite de repenser les échelles de la ville, allant du territoire à l'être humain, dans un horizon temporel qui tient à la fois compte de son histoire et des générations à venir.

Le développement durable propose donc un mode de développement éthique qui consiste à faire vivre ensemble sur Terre les êtres humains et les écosystèmes dans le respect de leurs différences, tout en assurant le renouvellement de l'héritage naturel et culturel qu'ils constituent pour les générations à venir. Ainsi, le développement durable permet de réorienter la notion de développement, qui a souvent été utilisée uniquement dans le contexte économique, en la plaçant désormais dans le cadre de l'éthique.

Le développement durable de nos urbanisations relève d'une approche globale où interfèrent des dimensions objectives et quantifiables, telles que la consommation de ressources ou l'émission de polluants, et des dimensions plus qualitatives, tel que le confort des citoyens. De toute évidence, le développement durable nécessite de réintroduire la conception et la rénovation urbaine dans un cadre holistique. Le développement durable fait donc appel à l'élaboration de principes universels mais applicables localement à travers les multiples dimensions des sociétés humaines.

Le concept de développement durable offre l'opportunité d'intégrer une réflexion globale sur nos modes de vie et de développement en réunissant les dimensions environnementales, socio-culturelles et économiques entre elles et aux différentes échelles de l'humanité. Le concept de développement durable doit s'appuyer sur la recherche d'un équilibre entre les préoccupations environnementales (atteinte aux écosystèmes et à la biodiversité,...), les préoccupations sociales (accessibilité, qualité de vie, santé publique, équité,...) et les préoccupations économiques (utilisation efficace et rentable des ressources, ...). Il s'agit donc de définir une nouvelle éthique pour habiter-ensemble dans le respect des dimensions écologiques, socio-culturelles et économiques de notre milieu.

Enfin, on peut définir le développement durable comme la mise en pratique d'un certain nombre de principes qui visent à penser et à agir autrement, selon des valeurs fondamentalement éthiques. S'inscrire dans une logique de développement durable signifie tenter de mettre en oeuvre de nouvelles démarches, de nouvelles méthodes, de nouvelles grilles de lecture, de nouvelles stratégies au service d'un projet d'avenir à construire ensemble. Le développement durable est donc une dynamique, un processus d'évolution bien plus qu'un but en soi ou une série d'objectifs précis à atteindre. Il nous donne une direction.

C'est donc selon cette vision du développement durable que je vais aborder la question de la durabilité de nos urbanisations. Il est grand temps de prendre conscience à la fois de l'importance de notre milieu bâti sur notre qualité de vie et de la responsabilité de l'architecte et de l'urbaniste vis-à-vis de notre environnement et de notre planète.

Les enjeux du développement durable de nos urbanisations s'adressent aujourd'hui à tous les architectes, tous les urbanistes et toutes les personnes susceptibles de poser des choix importants du point de vue de l'aménagement de notre territoire (hommes politiques, ingénieurs des réseaux,...) mais aussi à chaque citoyen car nous modifions tous inconsciemment notre environnement urbain à travers nos modes de vivre et d'habiter.

1.1.2 Le développement insoutenable de nos urbanisations

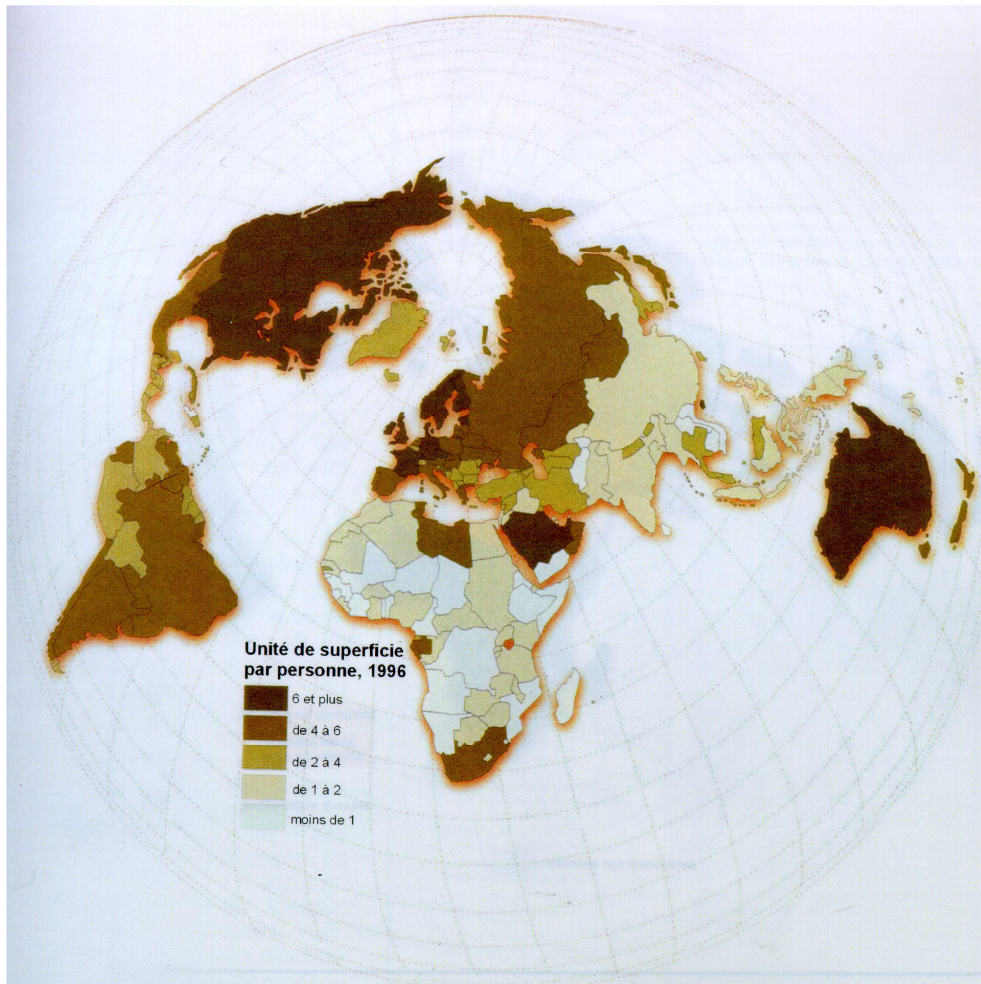
1.1.2.1 Les enjeux planétaires

Le concept d'**empreinte écologique** défini par Mathis Wackernagel et William Rees établit une estimation par unité de surface et par habitant de la pression des activités humaines sur les écosystèmes de la planète. L'empreinte écologique correspond au nombre d'hectares de sol et de mer productifs dont une personne a besoin pour répondre à sa consommation en ressources naturelles (aliments, énergie, bois,...) mais aussi pour absorber les déchets et la pollution qu'elle produit (émissions de CO₂,...).(Rees 2004)



Empreinte écologique des villes.

Le calcul de cette empreinte écologique, réalisé par le WWF (World Wildlife Fund) sur les bases de données publiées par les agences des Nations Unies et par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), montre que les modes d'exploitation, de production et de consommation actuelles dépassent de 30% les capacités des ressources naturelles à se renouveler et à absorber les pollutions (Sacquet 2002). Le dessin ci-dessous, repris du livre « Atlas mondial du développement durable », représente la répartition terrestre de l'empreinte écologique, en unité de superficie consommée par personne en 1996.



Répartition terrestre de l'empreinte écologique (Sacquet 2002).

L'empreinte écologique tient compte du nombre d'habitants, de leur consommation moyenne, des technologies et des infrastructures mises en œuvre. Tout développement urbain durable devrait présenter une empreinte écologique inférieure à 2 hectares/habitant, ce qui nécessite une transformation radicale de nos modes de vie et de nos urbanisations. La moyenne mondiale est de 2.85 hectares/habitant; un Nord-américain arrive à 12, un européen à 6, un asiatique et un africain à moins de 2.

De manière globale, l'humanité consomme aujourd'hui plus de ressources que la Terre n'est capable de lui fournir et produit plus de déchets que la Terre n'est capable d'assimiler. L'activité humaine mondiale actuelle correspond à l'exploitation renouvelable de 1.3 Terre. L'humanité entame donc aujourd'hui son capital écologique de près de 30% et les prévisions pour le futur vont vers un accroissement évident des ressources nécessaires dues au développement des pays

pauvres et à l'accroissement continu de la population mondiale sur la Terre. Notons qu'entre 1970 et 1996, l'empreinte écologique mondiale a été multipliée par le facteur 1.5.

Insistons sur le fait que la **démographie mondiale** est en continuelle croissance. Or, plus la population mondiale grandit, plus nous sommes nombreux à devoir nous partager les limites de la Terre. Le capital naturel n'est pas inépuisable... Si la totalité de la population mondiale atteignait un jour le niveau de vie actuel des européens avec le même type de mode de production et de consommation, il nous faudrait occuper l'équivalent de trois planètes de même capacité que la Terre.... La nature obéit à des cycles que nous sommes obligés de respecter dans le but de préserver l'existence de l'humanité sur Terre.

Rappelons que la **consommation énergétique** mondiale est en croissance exponentielle. La consommation d'énergie mondiale par habitant a doublé entre 1960 et 2000 (Gay 2004) et le niveau de la demande énergétique mondiale prévu pour 2020 est encore largement supérieur à cause de l'industrialisation de pays comme la Chine et l'Inde. Cet accroissement de la consommation énergétique mondiale risque de conduire à une catastrophe sur le plan des changements climatiques et des pollutions. En effet, les gaz à effet de serre induisent une augmentation générale de la température du globe. Nous rejetons aujourd'hui dans l'atmosphère 28 milliards de tonnes de gaz à effet de serre (CO₂, méthane, CFC, oxydes d'azote) pour nos besoins de transport, de chauffage, de climatisation, d'agriculture, d'industrie,... (Sacquet 2002). Ces valeurs sont énormes et dépassent largement les capacités d'assimilation naturelle de notre planète. Signalons que l'absorption naturelle du CO₂ par les océans est seulement de 2 milliards de tonnes. Le CO₂ est également assimilé par les végétaux qui stockent le carbone et libèrent l'oxygène au cours de leur processus de photosynthèse mais là aussi la rapidité de l'évolution de nos activités humaines polluantes a largement dépassé la capacité d'absorption des végétaux présents à la surface de la Terre. De plus, les déforestations massives générées par les activités humaines sont en train de diminuer encore la capacité végétale d'absorption des polluants sur Terre pour le futur. La photo ci-dessous illustre ce processus dramatique qu'est la déforestation actuelle de la forêt amazonienne.

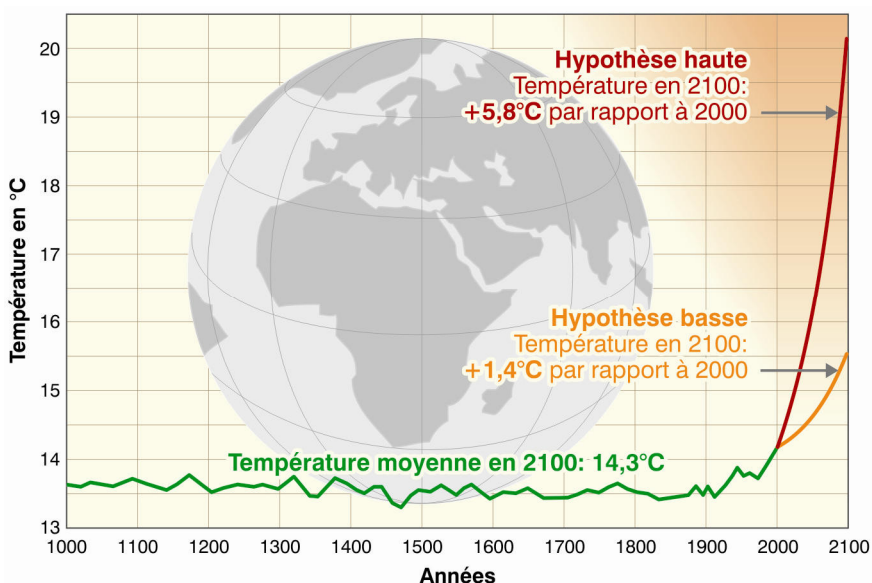


Déforestation de la forêt amazonienne (Liébard & De Herde 2005).

Dès 1990, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat annonçait des **changements climatiques** majeurs pour le 21^{ème} siècle et démontrait le lien de causalité entre les activités humaines et le réchauffement du climat global de notre planète depuis l'ère industrielle.

Le rapport 2001 du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indiquait que l'effet de serre a déjà amorcé une modification majeure du climat terrestre. Le rapport 2007 du GIEC a confirmé ces tendances. La seule incertitude encore présente est la détermination exacte de l'ampleur du phénomène.

Alors que la température planétaire a seulement varié de quelques dixièmes de degrés entre l'an 1000 et 1860, la révolution industrielle a favorisé par ses rejets en CO₂ une élévation de près de 0.8°C entre 1860 et 2000. La hausse de température prévue à l'heure actuelle par le GIEC entre 2000 et 2100 serait une augmentation de la température de l'air en surface de 1.4°C à 5.8°C en moyenne globale. Cette hausse de températures serait la plus ample de toutes celles survenues au cours de 10 000 dernières années. Elle n'est donc pas négligeable et ne peut être imputée uniquement à des phénomènes naturels cycliques. Le graphe ci-dessous montre les deux courbes d'évolution de la température sur Terre prédites par le GIEC en fonction d'une hypothèse pessimiste et d'une hypothèse optimiste.



Prédictions de l'évolution de la température moyenne terrestre (GIEC 2001).

L'ensemble des simulations prédisent que l'augmentation de la température moyenne sera plus importante sur les zones terrestres que sur les océans et qu'elle sera particulièrement importante sur l'hémisphère nord. Le protocole de Kyoto, décidé en 1997 pour limiter l'émission des gaz à effet de serre, ne correspond malheureusement qu'à 3% de l'effort nécessaire pour enrayer ce processus de réchauffement de la température moyenne de l'air sur Terre.

Les conséquences de ce réchauffement devraient toucher une grande majorité des populations de la planète, en particulier les états insulaires et les zones littorales menacées d'immersion, donc de disparition. La montée des eaux, une des conséquences prévisibles de ce phénomène, n'excéderait pas un mètre d'ici 2100, ce qui pourrait déjà provoquer le déplacement de 150 millions de personnes d'ici 2050. Signalons toutefois que les experts n'ont guère travaillé sur l'hypothèse d'une fonte des glaces de l'Antarctique, alors que la péninsule antarctique a déjà perdu 3% de sa calotte glaciaire depuis 1974. La prise en compte de ce phénomène pourrait entraîner une montée des eaux encore plus considérable.

Il n'apparaît pas improbable que les zones climatiques pourraient se déplacer vers les pôles de 150 à 500 km dans les régions de latitude moyenne modifiant ainsi

profondément les écosystèmes. Ces fortes transformations climatiques modifieront également profondément le tissu socio-économique local.

Signalons divers effets critiques de cette augmentation de température :

- la fonte des glaciers, la hausse du niveau des mers et donc des risques d'inondations en bordure des mers,
- la détérioration des sols (désertification, déforestation, salinisation),
- l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles (ouragans, inondations,...),
- la disparition de nombreuses espèces animales et végétales incapables de s'adapter aussi rapidement,
- la multiplication d'épidémies infectieuses sensibles à de minimes écarts de températures,
- ...

Les photos ci-dessous donnent quelques illustrations des effets du réchauffement de la planète lié aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre.



Hausse du niveau des mers au pôle sud (Liébard & De Herde 2005)

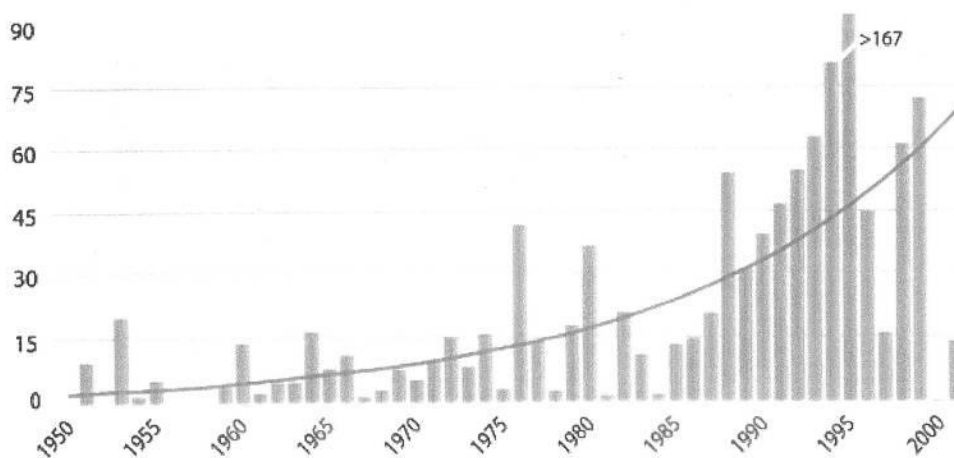


Assèchement des sols au Burkina-Faso (Liébard & De Herde 2005)



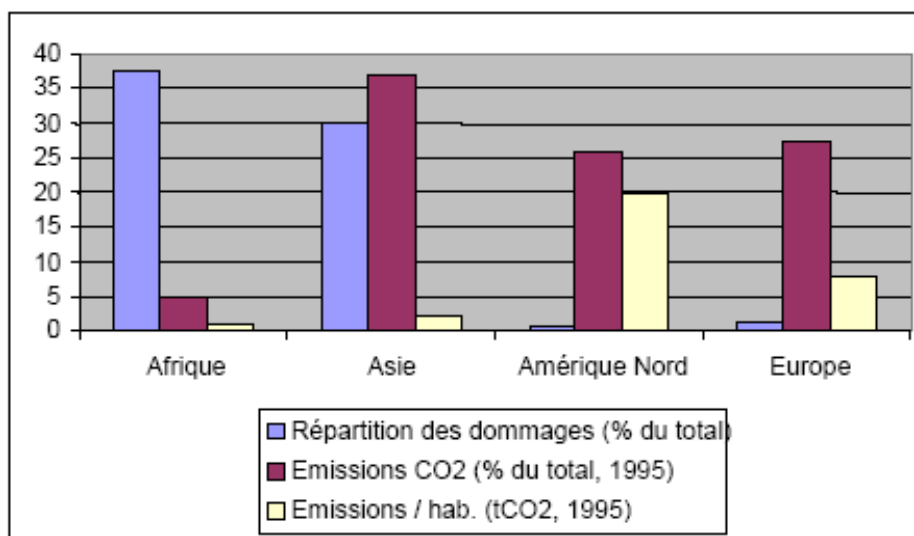
Catastrophe naturelle au Mexique (Photo: CEE)

Entre 1991 et 2000, près de 700 000 personnes sont mortes (dont 83% en Asie) à la suite de catastrophes naturelles : inondations, glissements de terrain, éruptions volcaniques, tempêtes, cyclones, séismes,... (Sacquet 2002) Ces catastrophes ont toujours existé mais leur ampleur a considérablement augmenté. Le graphe ci-dessous montre l'augmentation considérable du coût économique mondial des grandes catastrophes naturelles entre 1950 et 2000.



Coûts des grandes catastrophes naturelles en milliards de dollars entre 1950 et 2000 (Snoy 2005).

Il est important de souligner l'un des problèmes majeurs des changements climatiques : les pays principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre (les pays industrialisés en général) ne sont pas les pays qui subiront les principaux dommages liés aux changements climatiques. Le schéma ci-dessous permet de comparer la répartition par continent des dommages dus aux catastrophes naturelles (selon l'étude ExternE) et les niveaux d'émissions de CO₂ (en % du total d'émissions et en émissions par habitant). Ce schéma montre à quel point les pays qui souffriront le plus des changements climatiques sont ceux qui aujourd'hui y contribuent le moins. (CEESE 2001)



Comparaison mondiale entre la répartition des dommages et la répartition des émissions de CO₂ (CEESE 2001)

Le dioxyde de carbone est retenu par l'atmosphère pendant de nombreuses décades. Même si nous réduisons nos émissions polluantes à partir d'aujourd'hui, nous expérimenterons de toute façon les impacts du changement climatique global au cours du 21^{ème} siècle et au-delà. Si nous ne prenons pas rapidement des mesures strictes pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, ces effets seront encore plus dramatiques dans les années à venir.

Pour limiter les risques des changements climatiques, il est indispensable de maintenir l'augmentation de la température moyenne terrestre de l'air sous la barre des 2°C par rapport à la température pré-industrielle. Cela signifie que les pays industrialisés doivent réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 30% d'ici 2020 et de 80% d'ici 2050 par rapport à l'année 1990. Il est intéressant de constater qu'une extrapolation des tendances européennes actuelles, sans modification politique importante, prévoit par contre une augmentation de 50% des émissions de CO₂ d'ici 2050. Cette éventualité souligne la nécessité urgente de politiques efficaces de lutte contre les changements climatiques.

Des prises de position politiques fortes ainsi qu'une modification radicale des comportements actuels sont indispensables pour limiter le processus global de changement climatique entamé et réduire ses effets dévastateurs pour la nature et l'homme. Il faut donc à la fois réduire les consommations d'énergie et limiter le recours aux énergies polluantes par le développement des énergies renouvelables.

En plus du processus de réchauffement climatique, les **hauts niveaux actuels de pollution** de l'air, de l'eau et du sol ont des effets néfastes sur la santé humaine. L'importance de la santé est unanimement reconnue en tant que facteur de bien-être individuel et de facteur socio-économique jouant un rôle déterminant pour le développement durable de l'humanité. Signalons que 25000 habitants du Tiers-monde meurent chaque jour à cause de la contamination chimique et bactériologique de l'eau.

Autre enjeu alarmant pour l'environnement naturel de notre planète : **la perte de la biodiversité**. La biodiversité constitue l'ensemble des formes de vie sur Terre : les plantes, les animaux, les champignons, les microorganismes, les gènes qu'ils contiennent et les écosystèmes dont ils font partie. La biodiversité disparaît aujourd'hui à un rythme inquiétant. La Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme publie de nombreuses constatations alarmantes telles que :

- 80% des forêts primaires sur Terre ont déjà disparu au profit de l'urbanisation, des infrastructures, des activités agricoles et du fait du morcellement des terres. Au cours de ces dix dernières années, 940 000 kilomètres carrés de forêts ont été abattues, ce qui équivaut à trente fois la superficie de la Belgique, alors qu'elles sont indispensables à l'équilibre des climats et des écosystèmes ainsi qu'à la dépollution atmosphérique.
- L'agriculture du 20^{ème} siècle a stérilisé 25% des terres cultivables de notre planète. Environ 30% des races d'animaux d'élevage sont menacées d'extinction.
- Depuis 1900, environ 75% de la diversité génétique des plantes cultivées a été perdue.
- Plus de 70% des pêcheries de poissons marins font l'objet d'une surpêche ou d'une pêche à la limite de leurs capacités de renouvellement.
- 20 à 50% des espèces animales et végétales pourraient disparaître avant la fin du 21^{ème} siècle : un amphibien sur trois, un oiseau sur huit, un mammifère sur quatre sont menacés d'extinction.

Le manque de respect humain pour la nature (pollution, déchets, surexploitation,...) détruit progressivement les ressources vivantes sur Terre. Cette crise nécessite le développement et la mise en œuvre urgente de stratégies et politiques qui anticipent, préviennent et réduisent les causes de ce déclin.



Conséquence de la pollution produite par l'homme (Photo : CEE).

Toutes les formes de vie sur Terre constituent un patrimoine essentiel de l'humanité. Endommager les équilibres écologiques de la flore et de la faune est donc un crime pour les générations futures. La biodiversité nous fournit abri,

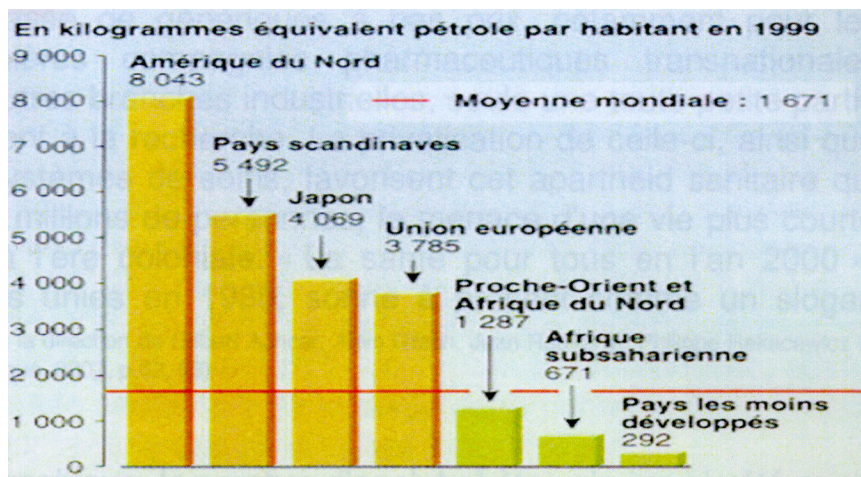
nourriture, eau potable, vêtements et médicaments. Dans sa diversité et sa complexité, elle garantit le bon fonctionnement des écosystèmes qui rendent des services irremplaçables à l'humanité.

Pire que l'élimination des ressources naturelles, l'empreinte des activités humaines a un impact sur la structure et la fonction des écosystèmes terrestres. Il est bien trop tôt pour pouvoir prévoir toutes les implications de ces changements mondiaux extrêmement rapides sur le fonctionnement de notre planète mais rien ne permet de prédire si ces modifications profondes seront favorables à la survie de l'espèce humaine sur Terre.

Enfin, il est bon de rappeler qu'aujourd'hui 82.7% des richesses du monde sont consommées par 20% de sa population et que les 60% les plus pauvres doivent se contenter de 5.6% des ressources de la planète. Cette **disproportion dans la répartition des richesses** met en péril l'avenir de l'humanité. La pauvreté, la faim, la soif sont des terrains fertiles pour de futurs conflits internationaux.

De même, les ressources en énergie sont limitées et mal distribuées, ce qui risque de générer des conflits importants... Or les **conflits armés** apportent la désolation pour les hommes et détruisent la biodiversité et les ressources naturelles locales, accentuant encore la pauvreté de la population.

L'accès à l'énergie est indispensable au développement social, à la lutte contre la pauvreté, à la satisfaction des besoins élémentaires que sont l'alimentation, le chauffage, l'éclairage, l'accès à l'information,... Le graphique ci-dessous présente la grande disparité actuelle quant aux consommations énergétiques moyennes par habitant pour différents pays. L'enjeu du développement durable consiste donc à maîtriser et à répartir plus équitablement les besoins. Les pays industrialisés doivent nécessairement réduire leur consommation pour permettre aux pays en développement d'accroître la leur. Les chiffres donnés ci-dessous correspondent aux consommations de 1999 reprises dans la banque de données en ligne de la banque mondiale.

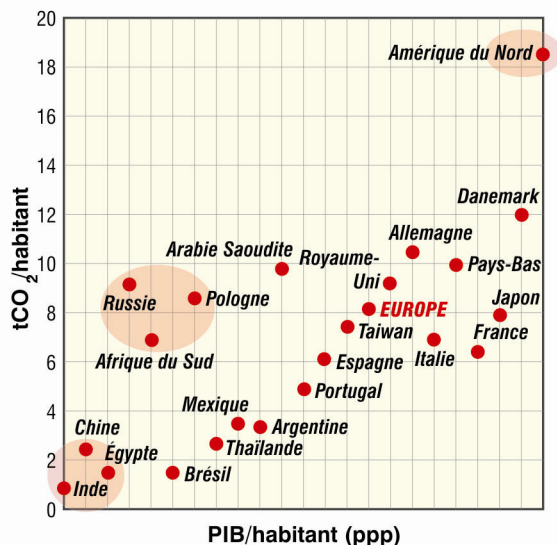


Consommation d'énergie par habitant

(Source : Banque de données en ligne de la Banque mondiale)

Il est toutefois indispensable de spécifier qu'on ne peut pas relier de manière directe la puissance moyennée consommée par habitant et le PIB par habitant. En effet, les Etats-Unis ont une consommation d'énergie annuelle nettement supérieure à celle du Japon, de la Suisse et du Danemark, alors que le PIB par

habitant est de 30 à 40% inférieur aux Etats-Unis par rapport au Japon, à la Suisse ou au Danemark (Gay 2004).



Relation entre les émissions de CO₂ par habitant et le PIB par habitant (Liébard & al 2004)

Réduire nos demandes d'énergie est un véritable challenge pour nos manières de penser et d'agir mais c'est une obligation pour le futur de l'humanité. Il est important de signaler que la Belgique se singularise par la perte d'énergie par bâtiment la plus forte en Europe ! Des actions importantes doivent donc être réalisées pour limiter les consommations énergétiques des bâtiments en Belgique.

L'union européenne tire actuellement près de 80% de son énergie primaire des combustibles fossiles. Il est donc évident que l'Europe manque d'autonomie énergétique vu que le pétrole, le gaz et le charbon sont disponibles sur son territoire mais en quantités très limitées et que les stocks d'uranium y sont virtuellement inexistantes. Ce manque d'autonomie par rapport à l'énergie pourrait dans les années à venir créer des risques de conflits politiques importants ou une élévation du prix de l'énergie difficilement acceptable pour notre économie. Cette dépendance croissante de l'Europe vis-à-vis de ses sources d'énergie externes, principalement des combustibles fossiles, a comme corollaires des effets sur la sécurité d'approvisionnement, sur les équilibres géopolitiques, sur l'économie, sur les prix des combustibles ainsi que sur l'accès équitable à l'énergie. Vu la perspective de l'épuisement de certaines ressources, ces enjeux risquent de devenir de plus en plus sensibles.

Signalons également que 40% de la population mondiale actuelle n'a pas accès à des facilités sanitaires adéquates, 850 millions de personnes ne savent ni lire ni écrire, 70% de la population rurale d'Afrique n'a pas accès à l'électricité, un enfant sur six ne va pas à l'école,... (Morhayim 2004).

La survie de l'espèce humaine nécessite que nous transformions collectivement et consciencieusement nos tendances socio-comportementales afin de tenir compte des besoins des différentes populations humaines, animales et végétales sur notre planète. Les valeurs fondamentales de notre société mondiale doivent passer de l'individualisme, d'un intérêt personnel étroit et de la compétition à une communauté vivante, protégeant l'intérêt mutuel des différentes parties dans une coopération globale. Rappelons cette célèbre phrase de Martin Luther

King : « *Nous devons apprendre à vivre ensemble comme des frères, sinon nous allons mourir tous ensemble comme des idiots* ».

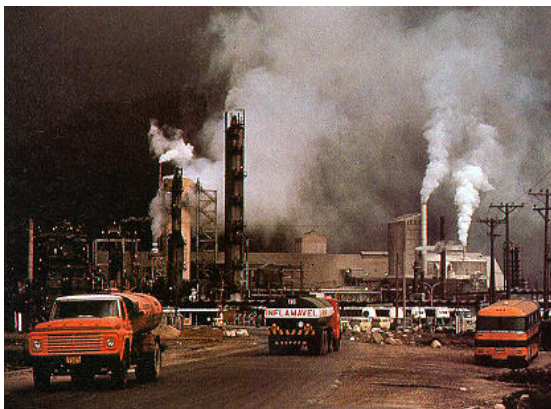
Il semble à l'analyse de cette situation que le développement de la sagesse humaine soit largement en retard sur le développement de son intelligence, essentiellement investie dans une avancée technologique. La mondialisation de l'économie, le mythe d'une croissance infinie et la raréfaction des ressources naturelles nous amènent à une impasse. Transformer cette vision du monde implique d'accepter que les risques liés aux atteintes aux stocks de capitaux humains et environnementaux sont plus élevés que ceux liés aux atteintes au stock de capital économique. Cela signifie qu'aujourd'hui il est essentiel de prendre des mesures de protections sociales et environnementales fortes, même si leur coût économique à court terme peut sembler élevé.

L'avenir de l'humanité et de l'évolution de la vie sur Terre est aujourd'hui entre nos mains à tous.

1.1.2.2 Les enjeux urbains

Alors que le but fondamental de la construction des villes et des bâtiments consiste depuis la nuit des temps à améliorer les conditions de l'habiter humain sur la Terre, aujourd'hui l'évolution de nos urbanisations met en danger les conditions premières de son habitabilité tant pour les humains que pour de nombreuses races animales et végétales. Les enjeux critiques du développement durable de notre civilisation dépendent fortement à l'heure actuelle du développement de nos urbanisations. Signalons les problématiques urbaines suivantes : la pollution intensive, l'étalement territorial, les inégalités sociales, la désymbolisation de notre habiter et la prédominance perpétuelle de la technologie et de la consommation sur la création et le partage.

Le développement anarchique des villes, la croissance démesurée des transports autoroutiers et la pollution intensive due aux activités humaines sont parmi les causes fondamentales des dérèglements de la nature aujourd'hui. C'est le phénomène urbain dans son ensemble qu'il faut analyser, comprendre et reconsidérer pour enrayer ces processus catastrophiques. La photo ci-dessous est représentative de la très forte pollution atmosphérique présente dans de nombreux grands centres urbains de notre planète.



Pollution atmosphérique à Cubatao au Brésil (Liébard & De Herde 2005).

La **croissance urbaine** est le phénomène le plus marquant de l'évolution des territoires depuis la révolution industrielle et cette constatation est valable à peu

près partout dans le monde. Sur un siècle, entre 1900 et 2000, le nombre de villes de plus de 10 millions d'habitants est passé de 2 à 50 et le nombre d'habitants dans les villes est passé de 150 millions à 3 milliards, soit 50% de la population mondiale. Les cinq premières villes les plus peuplées sont Tokyo, Mexico, New York, Sao Paulo et Shanghai. Plus de 80% de la surface terrestre se trouve sous influence humaine (infrastructures ou activités agricoles) et il n'existe plus de territoire véritablement vierge.

Cette croissance urbaine est liée à un étalement urbain peu dense. Ce développement urbain au-delà des limites de la ville traditionnelle remet en question la définition de la ville, son mode de fonctionnement, son tissu de relations et ses usages quotidiens. De plus, cette croissance urbaine est rarement un processus constant et homogène. Le territoire urbanisé s'étend en créant un ensemble de vides et de pleins souvent peu organisés.

Cette croissance urbaine contemporaine selon une organisation peu dense et déstructurée génère une consommation importante d'espace et de territoire naturel. C'est ce phénomène qu'on a baptisé sous les noms d'**étalement urbain**, de ville diffuse, d'urbanisation dispersée et de désurbanisation. Les photos ci-dessous (Liébard & al. 2004) montrent deux exemples européens caractéristiques de cet étalement urbain consommateur d'espaces naturels.



Banlieue de Londres (Liébard & al. 2004).



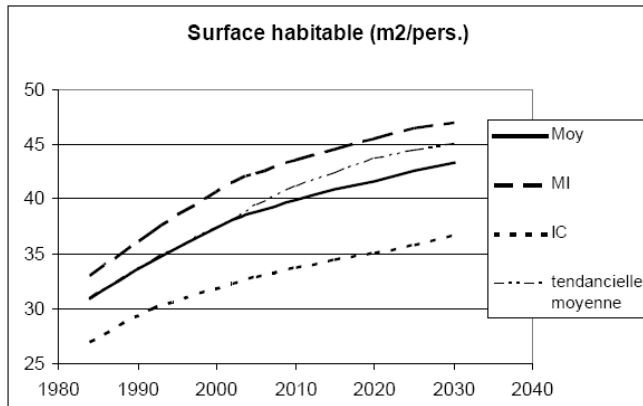
La Défense (Liébard & al. 2004).

Ainsi, l'extension des villes ne s'est pas faite au même rythme du point de vue du nombre d'habitants et du point de vue de la superficie bâtie en hectares. Par exemple, entre 1970 et 1990, la surface urbanisée autour de Chicago s'est accrue de 46% tandis que sa population n'a augmenté que de 4% (Liébard & al. 2004). De même, les zones urbaines européennes se sont étendues de 20% entre 1980 et 2000 alors que la population vivant dans ces zones n'a augmenté que de 6% (CEE 2004).

En ce début du 21^{ème} siècle, les surfaces bâties européennes continuent de croître fortement malgré un ralentissement de la croissance de la population. Cette augmentation des surfaces construites par personne est due à plusieurs facteurs (LET & LTMU 2006) :

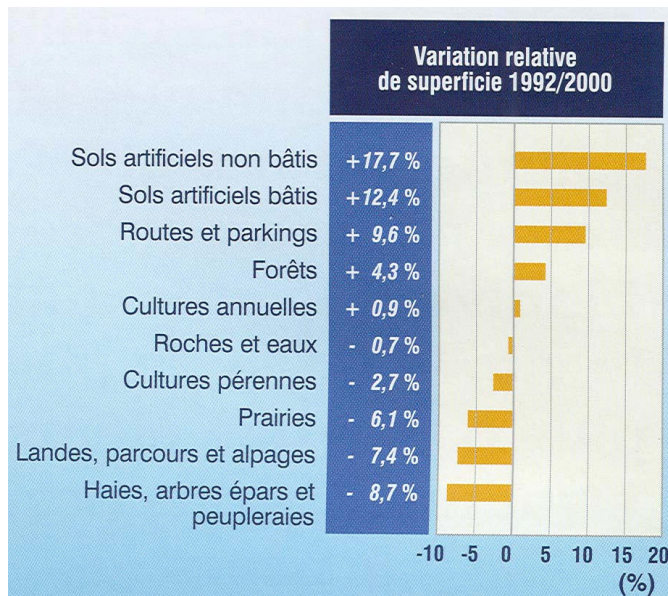
- l'augmentation de la part de maisons individuelles dans les logements neufs accompagnée d'une augmentation du pourcentage de maisons isolées (« 4 façades »), qui offrent une surface habitable par personne de 20 à 30% supérieure à celle des logements en immeuble collectif,
- la résorption des conditions de surpeuplement, qui concernaient encore un cinquième des logements en France en 1973 (au sens de l'INSEE- Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques).
- la diminution de la taille moyenne des ménages ; en effet, en France, un ménage moyen comprenait 2.7 personnes en 1984, il en compte 2.36 en 2002 et devrait tomber à 2.1 en 2030 selon les prévisions.

Ces différentes tendances se traduisent par une évolution importante de la surface habitable par personne. En France, on est passé d'une moyenne de 31 m²/personne en 1984 à 37 m²/personne en 2002 et les projections prédisent qu'on devrait atteindre une moyenne de 43.4 m² par personne en 2030. Le graphe ci-dessous présente l'évolution passée et les projections futures des surfaces habitables dans les maisons individuelles et les immeubles collectifs en France. (LET & LTMU 2006)



Evolution et projection des surfaces moyennes habitables par personne en France, en fonction des maisons individuelles (MI), des immeubles collectifs (IC) et de la tendance moyenne. (LET & LTMU 2006)

Toutefois, les surfaces urbanisées augmentent encore plus rapidement que les surfaces bâties. Le tableau ci-dessous montre l'évolution de l'occupation physique du territoire en France métropolitaine entre 1992 et 2000. Ce tableau souligne le fait que les sols artificiels non bâtis (infrastructures routières,...) ont augmenté dans une proportion encore supérieure à celle des surfaces bâties. (Liébard & al. 2004)



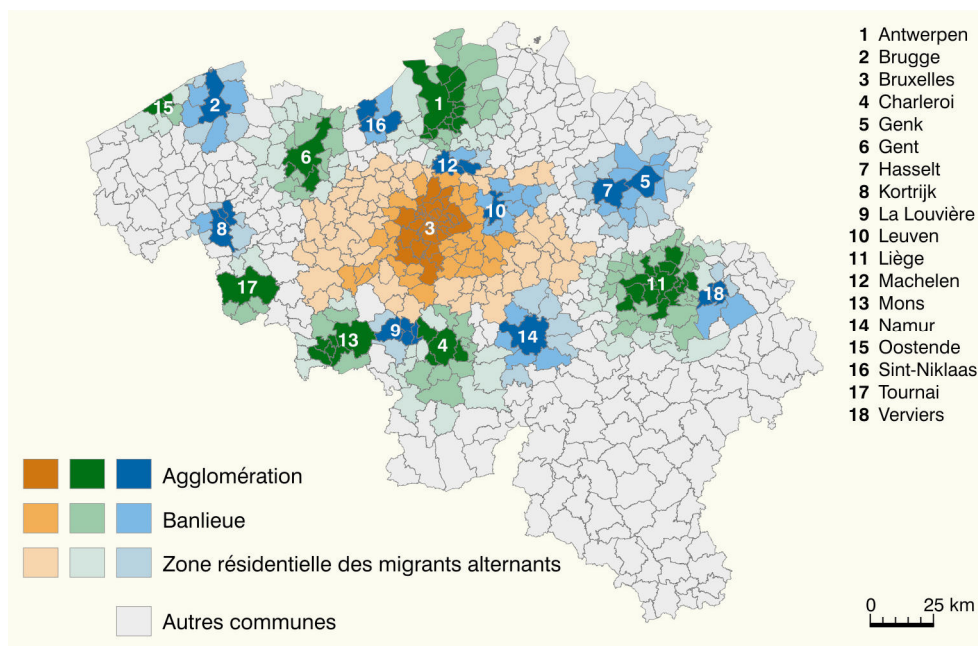
Evolution de l'occupation physique du sol en France métropolitaine (Liébard & al. 2004).

La révolution urbaine du vingtième siècle fut spectaculaire : elle a généré l'éclatement de la ville « traditionnelle » et l'urbanisation généralisée des campagnes. En Europe, cette révolution urbaine est associée à différents problèmes

critiques du point de vue du développement durable des urbanisations : l'étalement du tissu bâti, l'apparition du phénomène de lotissements, le développement du culte de la maison isolée, la multiplication des ruptures d'échelle et des espaces résiduels, l'utilisation sans cesse croissante de l'automobile, ...

La ville dispersée est un problème considérable qui touche tous les domaines de notre développement : social, politique, économique, écologique,... L'étalement territorial accroît les tendances à la ségrégation sociale, augmente les frais de la collectivité par rapport à la construction et à l'entretien des infrastructures et induit une consommation énergétique accrue tant au niveau de l'utilisation des bâtiments qui ne sont pas mitoyens que de l'augmentation des transports automobiles.

La Belgique est un exemple spécialement marqué du phénomène de désurbanisation. On passe progressivement de la notion de « ville » au concept de « région urbaine ».

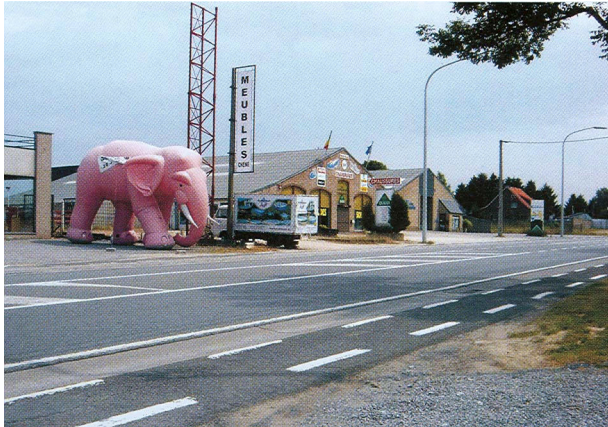


Surfaces des régions urbaines belges (Halleux 2005)

Au niveau de l'aménagement du territoire, la définition même des villes et sa délimitation physique deviennent dès lors une question très complexe. Différents critères peuvent être pris en compte tels que le taux de densité des habitants ou des bâtiments, un territoire important d'activités non agricoles, un bassin de navetteurs drainés par les emplois en ville,... Ainsi la région de Bruxelles-Capitale dans sa définition administrative ne compte pour l'instant que 19 communes et 161 km² mais sa véritable définition par l'Institut National de Statistiques recouvre 54 communes et une superficie de 1614 km². Ceci n'est pas une question anodine car la définition du territoire urbain a une importance primordiale sur les politiques ainsi que les dynamiques sociales, économiques et culturelles de cette urbanisation.

Le processus d'étalement urbain génère une dilution du tissu morphologique de la ville mais aussi de son tissu social. Ce phénomène s'accompagne généralement de la récession démographique des centres urbains et d'une certaine paupérisation des populations habitant au cœur des villes.

Du point de vue économique, cette désurbanisation se traduit par des charges croissantes pour les collectivités locales et leurs pouvoirs publics : agrandissement du réseau de voirie, extension et entretien des réseaux d'eau, de gaz et d'électricité, agrandissement de l'éclairage public, ramassage des déchets, épuration des eaux usées,... Les coûts liés à cet étalement urbain seront donc au cœur des préoccupations économiques de nos pays dans les années à venir. La photo ci-dessous montre à quel point cet étalement urbain engendre une consommation d'espace et un accroissement inutile des réseaux de transport et d'énergie (Liébard & al. 2004).



Surconsommation du sol ; exemple de la nationale 4 en Belgique (Liébard & al. 2004).

Les extensions contemporaines de nos urbanisations se font généralement indépendamment de tout centre et selon une densité bâtie faible. Il s'agit d'une accumulation désordonnée de lotissements de maisons « 4 façades », de kilomètres de routes où les commerces se succèdent indifféremment et sans relation les uns aux autres, d'immenses surfaces de parking, ... Cette ville diffuse ne naît d'aucune planification. Il s'agit d'un territoire morcelé issu de milliers d'initiatives isolées (habitants, promoteurs immobiliers, ingénieurs autoroutiers, investisseurs commerciaux,...). Vu que la surface terrestre n'est pas un bien illimité, il est clair que ce processus d'extension d'une ville « à la campagne » détruit les paysages naturels qui sont à la source de ce désir d'étalement. Au niveau environnemental, ses conséquences néfastes sont la disparition du paysage rural, la modification des nappes phréatiques, la production supérieure de gaz à effets de serre par l'utilisation accrue de l'automobile et l'augmentation des déperditions de chauffage car les bâtiments sont rarement mitoyens.

La typologie du logement « 4 façades » s'est fortement répandue ces dernières années. Cette typologie est cependant peu économe en ressources environnementales. Le développement de ces quartiers suburbains résidentiels dévore lentement les surfaces agricoles. La superficie des sols dédiés à l'agriculture est ainsi en continuelle diminution en Belgique alors que la superficie des terrains bâtis ne fait qu'augmenter. Pourtant, la préservation des sols agricoles sont indispensables pour l'empreinte écologique de la Belgique dont la densité de population est déjà importante... En outre, au plus la superficie totale des façades est importantes, au plus la quantité des matériaux de construction est importante, au plus l'urbanisation consomme des sols naturels et au plus les déperditions thermiques des bâtiments augmentent.

De manière générale, c'est l'ensemble de nos bâtiments qui s'inscrivent de moins en moins dans des structures mitoyennes compactes et s'isolent donc spatialement

de plus en plus. Ce changement typologique participe à augmenter fortement l’empreinte écologique globale de nos bâtiments malgré les mesures techniques prises dans le but d’économiser leurs consommations d’énergie. En effet, les mesures techniques adoptées limitent les consommations d’énergie au m² bâti (augmentation du niveau réglementaire d’isolation des constructions neuves,...) mais ne permettent pas de diminuer les consommations de ressources imputables par personne. Ainsi, selon l’Institut National Belge de Statistique, la consommation énergétique finale du secteur domestique a augmenté de près de 10% entre 1990 et 2000.

Un autre problème grave de cette modification typologique urbaine est sa **monofonctionnalité**. Le territoire périphérique d’une agglomération actuelle est généralement segmenté en zones d’activités séparées les unes des autres : lotissements, zones commerciales, zones industrielles,...



Exemple de monofonctionnalité du territoire (Halleux 2005)

Ce phénomène existe aussi bien au niveau du territoire qu’à l’échelle de nos villes, nos quartiers, nos villages. Les conséquences de cette monofonctionnalisation du tissu bâti en sont des déplacements de plus en plus fréquents entre zones urbaines différentes et des distances de plus en plus longues à parcourir.

Le processus de désurbanisation allié à la monofonctionnalisation du territoire urbain génère une augmentation croissante de l’utilisation de la voiture et donc l’augmentation des consommations d’énergie et des émissions de CO₂. L’urbanisme dispersé génère une dépendance par rapport à l’automobile, dont les effets indirects néfastes aux échelles locale, régionale et globale, sont la pollution atmosphérique, les nuisances sonores, la consommation de ressources (espace et énergie), la congestion, les accidents de la route,... Selon l’Institut National Belge de Statistique, les déplacements des personnes ont augmenté de 182% entre 1960 et 2002, cet accroissement provenant principalement de l’augmentation des déplacements en voiture.

Conséquence de l’augmentation du trafic général, les infrastructures routières prennent de plus en plus de place dans l’organisation de nos paysages, aussi bien quantitativement que qualitativement. Entre 1970 et 2000, le réseau routier belge a augmenté de 56%, le réseau de voiries communales participant pour 94% de cette augmentation (phénomène des lotissements,...). Il est donc évident que cet

étalement disproportionné et l'investissement économique qu'il nécessite pour la construction et l'entretien de ce réseau de transport individuel n'aide pas au développement de moyens de transports collectifs.

Le transport est un chaînon indispensable du développement de notre société d'aujourd'hui (participation sociale, dynamisme économique, style de vie, ...). Cependant, les tendances actuelles en matière de transport s'avèrent insoutenables. Le transport et la mobilité sont aujourd'hui une des causes importantes de nombreux effets néfastes indéniables sur le bien-être et la santé de la population, la qualité de l'environnement ainsi que sur le développement économique de nos urbanisations (consommation d'énergie, accidents de la route, dégradation de la nature et des villes, ...). Ainsi, il faudrait analyser comment promouvoir des modes de transport efficaces et rentables qui soient en accord avec les principes du développement durable. Et comme nos modes de transport insoutenables sont fortement connectés avec nos modes d'habiter insoutenables, il est important de considérer également une gestion durable du territoire urbain comme une priorité pour la distribution d'une mobilité durable.

En effet, un transport public efficace est un moyen de transport qui assure une accessibilité et une rapidité convenant à la majorité des utilisateurs potentiels. Un moyen de transport rentable économiquement pour la collectivité implique qu'il soit largement utilisé. Ainsi, pour qu'un système de transport public soit efficace et rentable, il doit être conçu en parallèle avec une gestion du territoire qui favorise une certaine densité construite, la concentration de fonctions diverses et la qualité des espaces publics.

On assiste également à un effet « boule de neige » : l'étalement urbain et la monofonctionnalité du territoire participent activement à l'augmentation du transport routier qui en retour participe au déclin des espaces urbains traditionnels, à la dispersion urbaine, à sa monofonctionnalisation et aux phénomènes de ségrégation sociale qui y sont liés.



Déclin des espaces urbains traditionnels (Halleux 2005)

Il y a aussi un effet pervers au fait que la périurbanisation résidentielle attire une périurbanisation des activités économiques (services, centres de loisirs, médecins, bureaux d'avocats, commerces de luxe, services informatiques,...), traditionnellement localisés en ville, ce qui attire encore davantage de personnes en périphérie. La désurbanisation suscite donc un affaiblissement progressif de l'avantage des quartiers centraux.

Une autre conséquence inquiétante de ce mode d'urbanisation est que les lieux d'activités traditionnels autour desquels s'organisaient les quartiers urbains et les

villages sont délaissés au profit de « non lieux » au bord d'axes autoroutiers ou de routes à grand trafic. La désymbolisation de nos lieux de vie et de rassemblement risque de nous faire perdre les traces de notre Histoire et de nous couper des valeurs humaines fondamentales.

Se positionner par rapport à l'architecture, c'est toujours affirmer une façon d'habiter le monde. Dans une analyse de « La Crise de Bruxelles », M. Peemans signalait l'évolution suivante : *« On est passé de la production de lieux-référents symboliques où l'articulation espace-temps se définit par rapport au regard humain et à un rythme proche de la marche humaine (...) à la production d'espaces-fractions de territoire urbain dont la nature se définit uniquement en termes de fonction (...) et dont l'articulation espace-temps se définit par rapport aux contraintes économiques et techniques régissant l'accomplissement efficace de chaque fonction isolée »*. La question de l'espace édifié est donc devenue une urgence; elle n'est plus politique ou esthétique mais anthropologique.

Ainsi, cette transformation profonde de la morphologie de nos villes génère une consommation d'espace considérable et une perte des valeurs fondamentales qui constituaient nos paysages bâtis.

Le développement durable remet en cause ces pratiques actuelles de construction, gaspilleuses en énergies et en paysages, coûteuses en construction et en maintenance, destructrices de lien social et de significations. L'accessibilité à un habitat soutenable, qui favorise les solidarités, qui soit efficace sur le plan environnemental, économe en ressources et créateur de sens est un défi pour nos sociétés contemporaines.

Les paragraphes ci-dessous donnent rapidement quelques pistes à suivre pour favoriser le développement durable des urbanisations européennes selon les points de vue environnemental, social et économique.

Le contenu de la dimension environnementale du développement durable des urbanisations couvre la préservation et le développement des ressources naturelles à l'intérieur comme à l'extérieur des urbanisations. Voici quelques exemples du type de questions auxquelles il faut répondre pour évaluer nos urbanisations contemporaines du point de vue environnemental et les améliorer :

- Quelle est l'empreinte écologique de nos urbanisations ?
- Comment limiter la tendance actuelle à l'étalement urbain qui réduit les espaces naturels et la biodiversité ?
- Comment concevoir des espaces publics urbains susceptibles de rendre la vie en ville plus attrayante et ainsi de valoriser une renaissance de la fonction résidentielle urbaine ?
- Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre par une conception judicieuse de l'aménagement territorial, du transport urbain et de la conception des bâtiments ?
-

Le contenu de la dimension humaine et sociale du développement durable couvre la préservation et le développement du bien-être humain, ce dernier étant déterminé par des caractéristiques personnelles (santé, libertés individuelles...) ou collectives (cohésion sociale, équité, ...). Voici par exemple le type de questions auxquelles il faut répondre pour évaluer nos urbanisations contemporaines du point de vue socio-culturel ou les améliorer :

- Les services et les zones de détente sont-ils distribués de manière équitable sur l'ensemble du territoire urbain ?
- Des lieux publics de qualité sont-ils accessibles à l'ensemble des citoyens ?
- Comment favoriser par nos morphologies urbaines le respect de l'ensemble des droits et des libertés fondamentales de tous les êtres humains ?
- Comment assurer un urbanisme sain pour la santé des citoyens ?
- Comment favoriser la convivialité et la cohésion sociale par l'aménagement des espaces publics urbains ?
- Comment éviter la création de ghettos dans nos urbanisations ?
- Comment nos modes d'habiter peuvent-ils assurer la survie et le développement de nos valeurs (démocratie, patrimoine historique, tolérance religieuse, recherche artistique,...) ?
- ...

Le contenu de la dimension économique du développement durable urbain couvre la recherche d'un développement de la rentabilité économique de nos urbanisations en y intégrant les coûts externes que constituent par exemple les dégâts causés à la nature ou à la santé humaine par nos modes d'habiter. Voici par exemple le type de questions auxquelles il faut répondre pour évaluer nos urbanisations contemporaines du point de vue économique ou les améliorer :

- Quelles sont les influences de nos modes d'habiter sur l'économie locale et globale, à court et à long terme ?
- Quelle est l'influence de la morphologie urbaine et de la qualité des espaces publics sur la gestion d'un système de transport public efficace et rentable ?
- Comment prendre en compte les externalités qui participent à la définition d'un bilan économique durable ? Par exemple, l'analyse des externalités dues à un système de transport consiste à prendre en compte le coût à long terme pour la société de la pollution de l'air qu'il engendre, de la pollution sonore qu'il crée, des embouteillages générés,...
- ...

Notre point de vue est que la crise actuelle de notre développement provient d'une survalorisation de la technologie et de la rentabilité financière à court terme dans les choix et les projets de notre société au détriment de leurs dimensions environnementales, sociales, éthiques et même économiques en tenant compte de l'évolution à long terme de notre civilisation. Il est désormais indispensable de trouver des solutions qui revalorisent ces différentes dimensions au sein d'un développement équilibré. Au niveau de nos urbanisations, cela passe par une revalorisation d'une densité construite moyenne, alliée à une requalification des espaces publics urbains et une prise en compte du contexte local dans l'élaboration de tout nouveau projet. Il s'agit donc de retrouver les fondements d'un art de bâtir ancestral tout en y intégrant les avancées des techniques d'aujourd'hui pour réapprendre à vivre ensemble sans cesser d'évoluer.

1.1.3 Les principes de la conception durable des espaces publics urbains

S'interroger sur le développement durable urbain consiste à se questionner sur le rapport entre l'être humain et son milieu ainsi que sur les rapports au monde que nos espaces habités peuvent favoriser. Il s'agit donc de développer des modes d'habiter qui peuvent faire sens pour l'homme d'aujourd'hui et de demain au regard des enjeux globaux et locaux du développement durable.

La conception des espaces extérieurs fait partie intégrante de la mission de l'architecte. Créer un espace public durable est pour nous l'art d'offrir à autrui un monde habitable pour pouvoir vivre ensemble et en harmonie avec notre milieu.

Actuellement, les espaces publics sont trop souvent des parkings omniprésents ou des déserts suburbains sans forme. Le problème de nos urbanisations n'est pas vraiment un manque d'espaces ouverts mais bien le manque de lieux de qualité, capables d'enrichir l'expérience de vivre en ville. Les photos ci-dessous montrent quelques problèmes récurrents des espaces publics urbains actuels : la dissolution de l'espace public, sa privatisation, le manque de respect des projets architecturaux par rapport au contexte local et l'envahissement de l'espace public par les automobiles.



Quelques problèmes récurrents des espaces publics actuels (photos : S. Reiter).

L'urbanisation contemporaine peut être globalement caractérisée par la **perte du lieu**, ce qui a produit des espaces inhabitables. Un lieu se définit à la fois comme espace en soi et comme élément inséré dans un milieu précis lié à son site et son histoire particulière. Il faut réapprendre à donner lieu...

C'est pourquoi nous proposons d'utiliser le concept de lieu dans notre définition d'un espace public durable. L'espace public devrait toujours être un lieu de relation. Ainsi, l'adjectif public nous semble indispensable pour ajouter la connotation de collectivité et d'accessibilité essentielle à tout espace urbain. Le rassemblement de ces deux mots-clés donne l'expression **lieu public**. Nous allons tenter de définir ce qu'est un espace public durable à travers cette nouvelle notion de lieu public. Il est donc nécessaire de clarifier en quoi consiste la perte de lieu des espaces contemporains et ce qu'elle signifie pour l'homme.

Martin Heidegger nous rappelle que l'architecture nous relie à notre condition humaine, en tant qu'être humain incarné sur la Terre : « *Etre homme veut dire être sur terre comme mortel c'est-à-dire habiter* » (Heidegger 1958). On ne peut donc pas poser la question de l'établissement humain sans la relier aux trois niveaux de l'incarnation humaine: sa corporéité, sa sociabilité et sa spiritualité. Tout espace

bâti se positionne par rapport aux trois points de vue incontournables de l'expérience sur Terre:

- la corporéité ou enracinement de l'être,
- le domaine relationnel ou mise en relation de l'être,
- la métaphysique ou recherche de sens et essence de l'être.

Ainsi, le lieu public doit instaurer un rapport fondamental au monde, à autrui et à soi-même. Ce point de vue correspond à la définition d'Edgar Morin : « *Tout développement vraiment humain doit comporter le développement conjoint des autonomies individuelles, des participations communautaires et de la conscience d'appartenir à l'espèce humaine* (Morin 2000). »

Mais c'est justement là que se situe la perte de lieu des espaces contemporains : actuellement, les trois problèmes majeurs de nos espaces publics sont généralement leur absence d'intégration au contexte local, leur impossibilité à nous relier et leur manque de cohérence.

La ville dispersée génère une multitude d'espaces publics laissés pour compte : des espaces de circulation et non de vie ainsi que des grands vides inutiles au milieu des lotissements, des showrooms, des parkings, ... Ces espaces, sans limite ni structure, naissent la plupart du temps de la construction de bâtiments contemporains posés n'importe comment sur leur site sans aucun respect pour l'histoire du lieu et le contexte environnemental, construit et humain préexistant. Cette dilution des espaces publics sans racine, sans lien et sans cohérence est un témoin de l'absence de contextualisation des espaces urbains contemporains, de notre incapacité à générer des espaces de vie commune pour construire ensemble nos villes et de la perte de sens de notre habiter contemporain.

Ces espaces actuels créent donc une coupure inquiétante entre l'être humain et l'univers qu'il perçoit au travers du contexte construit qui l'entoure. Il est dès lors urgent de retrouver dans le partage de l'espace public un enracinement dans le contexte spatio-temporel du lieu (la contextualisation), une éthique de vie en société (la coexistence) et une échelle de valeurs communes (la cohérence).

C'est pourquoi nous proposons d'utiliser les trois concepts suivants pour définir les caractéristiques essentielles que doit présenter un espace public contemporain pour être durable ou, dit autrement, **les qualités fondamentales de tout lieu public** :

- la **contextualité** (ou inscription dans son milieu),
- la **coexistence** (ou mise en présence dense et complexe des différences),
- la **cohérence** (ou identité porteuse de sens).

Les pages qui suivent approfondissent la réflexion sur chacune de ces trois qualités fondamentales du lieu public : la contextualité, la coexistence et la cohérence. La conception d'un lieu public réside dans l'équilibre entre ces trois tendances qui s'affirment en se limitant et en se complétant l'une l'autre. Chacune peut se définir à partir de trois points de vue : quantitatif, qualitatif et dynamique (c'est-à-dire porteur de potentialités, d'évolution).

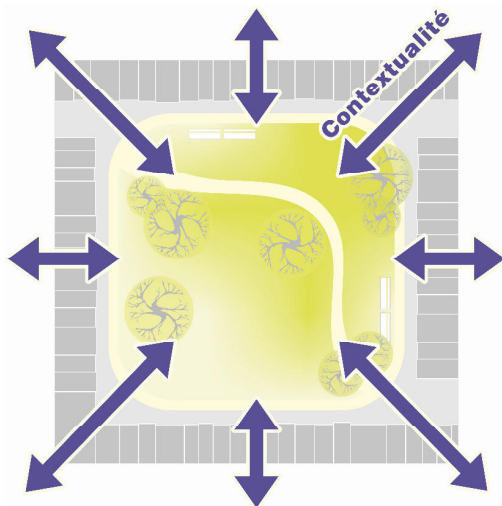
Cette structuration du caractère soutenable des espaces publics à partir de trois principes (déclinés en neuf qualités) est une proposition personnelle qui participe à l'originalité de cette thèse.

1.2 Contextualité

La pensée philosophique nous a habitués à voir l'univers comme une totalité, à l'intérieur de laquelle chaque être particulier n'existe que dans son rapport aux autres : tout est solidaire et interdépendant. De même, dans toutes les grandes traditions spirituelles, on nous dit que les êtres sont distincts mais qu'ils ne sont jamais séparés. Il faut aussi entendre la physique nouvelle, issue de la mécanique quantique et de la relativité générale, tenir un langage similaire : on y parle de la non-séparabilité des éléments, formant un seul tissu cosmique. L'univers se manifeste comme une totalité dont toutes les parties sont en interconnexion entre elles et en relation avec le tout. Chaque particule élémentaire apparaît même essentiellement comme un noeud de relations et d'événements.

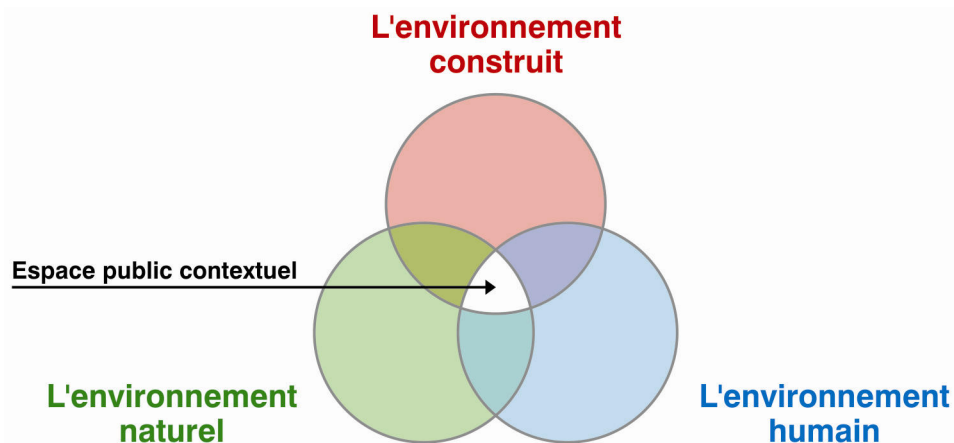
Bref, la physique moderne, la philosophie et les traditions spirituelles semblent être d'accord pour nous dire que, dans l'univers, le jeu de l'interconnexion est fondamental. Tout être fait partie d'un réseau de relations qui définissent sa qualité d'être-au-monde. C'est aussi ce que nous dit Augustin Berque : «*dans un milieu réel, il n'existe d'identités qu'en relation avec d'autres identités* » (Berque 1990). Notre habiter est donc toujours simultanément local et global. Ainsi, pour devenir lieu, un espace public se doit de créer des liens entre son espace spécifique et son milieu, défini comme le contexte global, à la fois physique, construit et humain, dans lequel il s'inscrit.

La première qualité fondamentale d'un lieu public est donc la contextualité, définie comme son **inscription dans son milieu**. Il n'y a pas de lieu sans interactions multiples entre son espace propre et le milieu auquel il appartient. Un espace public devient lieu public par les relations qu'il tisse avec son milieu. Le mot contextualité est choisi parce qu'il renvoie au contexte, cet ensemble du texte qui entoure une phrase ou un mot et dont dépend son sens.



Le milieu regroupe à la fois le contexte naturel, le contexte construit et le contexte humain. Le contexte naturel est défini par la localisation, la topographie, le climat et les différentes ressources naturelles de ce milieu particulier. Le contexte construit est déterminé par la morphologie du bâti (en tant qu'organisation spatiale, organisation de la communication, expression formelle, expression signifiante et héritage historique). Enfin, le contexte humain est à la fois culturel, social, politique et économique: il définit le type d'utilisateurs de l'espace public considéré.

La définition d'un espace public durable nécessite donc la description de ses trois composants de base : l'environnement naturel, l'environnement construit et l'environnement humain ainsi que leurs relations mutuelles. Donnons quelques exemples des relations nécessaires entre ces contextes pour créer un espace public durable... A l'intersection de l'environnement naturel et de l'environnement construit, on trouve les préoccupations suivantes : utilisation rationnelle des ressources naturelles, diminution des consommations d'énergie des bâtiments, limitation de la pollution, cohérence entre les niveaux artificiel et naturel, ... A l'intersection entre l'environnement naturel et l'environnement humain, il est nécessaire de tenir compte de différents éléments tels que le confort à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments (confort visuel, thermique, respiratoire, acoustique, au vent, ...), la capacité de contrôler son environnement, la valorisation des éléments naturels, ... Enfin, à l'intersection de l'environnement construit et de l'environnement humain, il faut étudier la continuité historique, l'utilité et la fonctionnalité (affectations,...), la participation des citoyens, le confort culturel (mixité, sécurité, appropriation,...), le sens du lieu, la symbolique, ...



D'autre part, notons que cette mise en relation de l'homme et de son milieu à travers un espace public est de nature spatio-temporelle car comme le dit Bernard Reichen : « *le milieu est une notion variable, tant géographiquement (toute culture ne propose pas le même mode d'habiter) que temporellement (le mode d'habiter au sein d'une culture évolue dans le temps tout en s'élaborant dans la continuité)* ». Il y a donc deux types d'échelles à prendre en considération :

- l'échelle spatiale: bâtiment > place > quarti erritoire > Monde,
- l'échelle temporelle: instant > journée > saison > année > époque > Histoire.

Il est donc nécessaire de reconnaître cette multi-dimensionnalité de notre milieu et d'étudier un lieu en fonction de ces différentes dimensions. Chaque niveau de questionnement est en interactions permanentes avec toutes les autres dimensions. Dès lors, on ne peut étudier un aspect spécifique d'une urbanisation, comme par exemple le point de vue économique ou le microclimat, sans le replacer dans un contexte plus large et analyser les interactions entre cet aspect spécifique et une compréhension plus globale du milieu urbain.

Norberg-Schulz est sans doute l'auteur qui a le plus contribué à faire émerger l'importance de la contextualité : pour lui, l'architecture est comprise comme la « *concrétisation d'un espace existentiel* », formule qui désigne les relations fondamentales qui lient l'homme à son milieu.

Augustin Berque nous dit qu'« *un milieu se manifeste par des ressources, des contraintes, des risques et des agréments* » (Berque 1990). Tout espace de qualité devrait profiter des ressources du milieu, se protéger de ses contraintes, apporter au milieu des agréments et n'y occasionner aucun risque. Pour s'inscrire dans son milieu, l'espace public doit donc s'y **intégrer** (c.à.d. bénéficier des ressources et se protéger des nuisances du milieu) et y **participer** (c.à.d. produire des avantages pour le milieu et le protéger de tout risque). Il y a donc une double dimension dans la relation d'un lieu au monde: réceptive et active.

Outre cette action réciproque entre le lieu et le milieu, il faut ajouter que le lieu doit aussi pouvoir **s'adapter** aux modifications du milieu.

Les photos ci-dessous permettent de comparer du point de vue architectural et urbanistique un lieu contextuel et un espace mal inséré dans son milieu. En effet, le Mont des Arts, situé à gauche, s'inscrit dans le centre de Bruxelles en créant une connexion entre le haut et le bas de la ville, tout en offrant un espace agréable et ouvert à de multiples appropriations possibles. En revanche, la place Rouppe, présentée à droite, montre à la fois le manque d'intégration architecturale de la tour du midi dans la morphologie urbaine du centre de Bruxelles et l'absence de participation de cette place à la vie du quartier à cause de son aménagement en parking.



Mont des Arts (Reiter 2003)



Place Rouppe (Reiter 2003)

Tout projet urbain se positionne par rapport à la relation de l'homme à son milieu à travers l'espace qu'il propose. Ainsi, cette relation influence la perception que les citoyens ont de leur environnement, ce qui en fait un moyen de responsabilisation des habitants. La contextualité remplace donc la conception urbaine dans son contexte éthique, alors que l'architecture contemporaine a trop souvent tendance à oublier son rôle éthique pour se limiter à celui de bien de consommation. La contextualité est une des caractéristiques fondamentales de tout projet urbain durable. Les paragraphes qui suivent analysent le concept de contextualité à travers les notions d'intégration, de participation et d'adaptation.

1.2.1 L'intégration

Sans ancrage dans son milieu, l'homme est désorienté, il ne sait ni où il est ni qui il est. La contextualité d'un lieu public implique l'intégration de ce lieu dans son milieu. S'intégrer dans son milieu consiste à profiter des opportunités offertes par le milieu et à se protéger des contraintes du milieu, aux différentes échelles. Cette intégration est favorisée par les continuités, le respect de la mémoire des lieux et la création d'espaces de transition entre les différentes échelles. Un lieu public tient compte de la spatialité et des temporalités de l'urbanisation dans laquelle il

s'inscrit. Pour s'épanouir, une place inscrit sa relation au milieu à travers les contextes physique, construit et humain.

Nous constatons toutefois que l'architecture contemporaine tient rarement compte du contexte local: c'est ce qui explique la présence de bâtiments et de quartiers identiques au nord et au sud de l'Europe, sans considération pour les différences de climat et de culture. La prise en compte des conditions locales devrait mieux permettre de tirer parti de la spécificité de chaque région et de chaque ville, de conserver leurs diversités traditionnelles, de lutter contre la tendance générale à l'uniformisation des constructions.

Les photos ci-dessous montrent des immeubles similaires construits dans nos régions et sous les tropiques... Il est temps de changer une conception aussi inadaptée.



Bâtiments similaires sous des climats très différents... (Architecture et Climat 2004).

Au niveau physique, les villes et les espaces publics ont besoin d'un climat, d'une végétation, d'un relief spécifique pour s'enraciner dans un lieu. La photo ci-dessous montre comment La Roche-en-Ardenne s'est développée à l'intérieur de limites naturelles.



Inscription de la ville de La Roche-en-Ardenne dans ses limites naturelles. (Ministère de la Région Wallonne 1985).

Le rôle des conditions naturelles en général, et en particulier du climat, dans la formation du paysage urbain et le fonctionnement de l'espace public est souvent sous-estimé aujourd'hui. Pourtant, la course du soleil et le type de lumière d'un milieu ont toujours été des éléments de base de la conception architecturale et urbanistique des villes et des villages traditionnels.

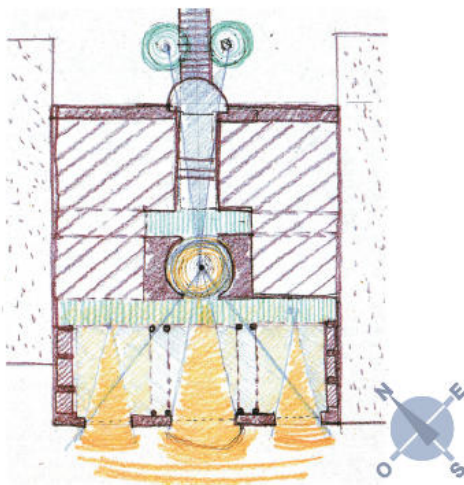
Ci-dessous, la photo de gauche présente l'intégration topographique d'un village et son étagement de manière à capter la lumière naturelle alors que la photo de droite montre que l'utilisation de ressources locales favorise la conservation de son patrimoine et la mise en valeur de ses caractéristiques régionales.



Intégration de la lumière et des ressources locales dans l'architecture traditionnelle. (Photo de gauche : Gilbert Bianchi ; photo de droite : S. Reiter).

Un exemple contemporain de l'intégration des bâtiments dans leur contexte naturel est donné par les stratégies de l'architecture climatique, qui permettent de profiter des ressources du climat local (gains solaires, ventilation naturelle,...) et de se protéger de ses contraintes (isolation des bâtiments, protections solaires,...).

La maison PLEIADE (Passive Low Energy Innovative Architectural Design) est un exemple d'application des principes de l'architecture climatique. Il s'agit d'une maison mitoyenne située à Louvain-la-Neuve en Belgique. Elle a vu le jour grâce à l'action de la cellule de recherche Architecture et Climat (UCL) et du CSTC ainsi qu'au soutien de la Région Wallonne et d'Electrabel.



La maison PLEIADE, conçue selon les principes de l'architecture climatique. (Architecte : P. Jaspard ; photo : Architecture et Climat).

Donnons aussi l'exemple des escaliers monumentaux de la ville de Rome qui participent à la définition d'une ambiance romaine par leur rapport spécifique au sol. La photo ci-dessous montre l'escalier de la Trinité-des-Monts, qui s'élève à partir de la place d'Espagne. Construit au 18^{ème} siècle, cet escalier s'harmonise parfaitement avec la forme de la colline.



La Trinité-des-Monts : intégration de la topographie naturelle à un espace public urbain.
(Photo : S. Reiter).

Introduire la nature en ville dans le but de nous reconnecter à notre environnement ne peut donc pas se limiter à planter quelques arbres sur une place. Il s'agit plutôt de recréer un lien entre l'homme et la nature, ce que Tchekov nous décrit si bien : « *L'homme a besoin, non pas de trois acres de terre, non pas d'une propriété à la campagne, mais de la terre toute entière, de la nature entière ; c'est dans cet espace qu'il pourra révéler sa nature et son individualité* » (Tchékov 1898). Ainsi, la présence de Central Park (1873) en plein centre de New York participe à la contextualité de la ville en révélant son sol naturel.



Central Park : le sol de New York révélé. (Rogers 2000)

Il existe des liens directs entre l'espace perçu, pratiqué et conçu. Jean Rémy et Liliane Voyé insistent sur l'importance de l'intégration d'un projet dans un contexte socio-culturel déterminé : « *nous veillerons à ne pas perdre de vue que les effets d'une même structure spatiale peuvent être différents sinon opposés, selon les modèles culturels et selon la position dans la structure sociale* » (Remy & Voyé 1982). Ainsi, Christian Gilot nous montre comment les rapports sociaux ont

participé à la construction de l'espace bâti de Bruxelles : « *les rapports à Bruxelles entre le Petit Sablon et le Grand Sablon prennent un sens particulier quand ils sont présentés à la lumière des rapports entre le haut et le bas de cette ville: d'un côté les palais et de l'autre les marchands, d'un côté la nature dessinée et de l'autre les espaces du moyen âge, d'un côté l'insolence magnifique d'édifices isolés et de l'autre la puissance d'épaulement des maisons alignées.* » (Gilot 1995)

Christian Norberg-Schulz nous donne aussi un exemple historique de cette intégration de la conception urbaine dans un milieu physique et humain : « *Dans les temps anciens, la survie dépendait d'un « bon » rapport avec le monde, au sens physique et psychique. Dans l'ancienne Egypte, par exemple, la campagne était non seulement cultivée par rapport aux inondations du Nil, mais de plus, la structure du paysage agricole était utilisée comme modèle pour la disposition des édifices « publics », ce qui devait donner à l'homme un sentiment de sécurité parce que cela passait par une symbolisation de l'ordre éternel de notre environnement.* » (Norberg-Schulz 1981)

S'enraciner dans le territoire urbain, c'est aussi s'intégrer dans son contexte construit, c.à.d. tenir compte des caractéristiques du bâti existant (gabarits, matériaux,...) et de son passé historique.

Par exemple, l'aménagement d'une place devrait respecter sa forme géométrique et l'histoire de ce lieu. Ainsi, pour des places irrégulières qui ont gardé des traces de leur organisation médiévale, il faut éviter d'imposer un quadrillage trop strict des éléments alors qu'une place régulière insérée dans un quadrillage de rues orthogonales appelle une disposition géométrique claire des éléments (symétrie, alignements,...).

A Lucca, la Piazza del Anfiteatro témoigne d'un contexte historique ancien : elle fut construite sur les fondements d'un ancien amphithéâtre romain : l'arène s'est transformée en place du marché...



Lucca : la Piazza del Anfiteatro, bâtie sur les fondements d'un amphithéâtre romain. (Kostof 1992).

Il est également nécessaire de se fondre dans l'ambiance générale de la ville ou du paysage construit. Ainsi, Maurice Merleau-Ponty décrit bien les qualités d'ambiance de la ville de Paris. « *Paris n'est pas pour moi un objet à mille facettes, une somme de perceptions, ni d'ailleurs la loi de toutes ces perceptions. Comme un être manifeste la même essence affective dans les gestes de sa main, dans sa démarche et dans le son de sa voix, chaque perception exprime dans mon voyage à travers Paris - les cafés, les visages des gens, les peupliers des quais, les tournants de la Seine - est découpée dans l'être total de Paris, ne fait que confirmer un certain style ou un certain sens de Paris. Et quand j'y suis arrivé pour la première fois, les premières rues que j'ai vues à la sortie de la gare n'ont été, comme les premières paroles d'un inconnu, que les manifestations d'une essence encore ambiguë mais déjà incomparable. Nous ne percevons presque aucun objet, comme nous ne voyons pas les yeux d'un visage familier mais son regard et son expression. Il y a là un sens latent, diffus à travers le paysage ou la ville, que nous retrouvons dans une évidence spécifique sans avoir besoin de le définir.* » (Merleau-Ponty 1945) Les photos ci-dessous soulignent les ambiances spécifiques de trois villes : Venise, Paris et Louvain-la-Neuve.



Ambiances urbaines : Venise, Paris et Louvain-la-Neuve. (Photos : S.Reiter)

Ce que nous soutenons ici n'est pas une sorte de « déterminisme du milieu »; nous disons seulement que tout bâtiment participe à la formation d'un milieu et que le fait de l'oublier conduit à l'aliénation du dit milieu. Les photos ci-dessous témoignent de la rupture contextuelle qu'introduisent de nombreux bâtiments contemporains au niveau de l'échelle des bâtiments, de leur typologie et des matériaux utilisés.



Rupture contextuelle et bâtiments contemporains hors contexte : Bruxelles et Londres. (Photo de gauche : S. Reiter ; photo de droite : A+ n° 179).

De nombreux projets urbains au vingtième siècle ont détérioré le tissu morphologique et social de Bruxelles, donnant naissance au terme « bruxellisation » pour signifier l'action de destruction et déstructuration du tissu urbain par l'implantation d'immeubles et de quartiers monofonctionnels sans âme. Citons l'exemple criant de la jonction de chemin de fer Nord-Midi qui a nécessité la destruction d'un des quartiers les plus anciens de Bruxelles, la construction de la cité administrative de l'état qui a aplani le sol de Bruxelles sur 61000 m² ou encore le plan d'aménagement du Quartier Nord en centre d'affaires monofonctionnel.

Cependant, s'inscrire dans le temps signifie aussi créer une architecture de notre temps. Respecter le contexte construit existant ne consiste pas à reproduire des objets et n'empêche nullement de créer une architecture contemporaine mais cela demande de tenir compte de l'ordre commun établi.

Les photos ci-dessous donnent deux exemples réussis d'une conception contemporaine intégrée. Le Carré d'Art, conçu par Foster, trouve sa place en tant que fragment moderne dans le tissu urbain de Nîmes. Son grand auvent assure son alignement par rapport aux bâtiments voisins, bénéficiant ainsi de la structure continue du centre-ville, tout en offrant une bonne protection solaire à sa façade vitrée. La gare de Louvain-la-Neuve se distingue comme un repère et une porte au cœur de la ville grâce à ses immenses arcades, tout en étant totalement intégrée dans le caractère de la ville, ses gabarits, ses matériaux,...



A gauche : le carré d'Art à Nîmes (architecte : L. N. Foster ; photo : S.Reiter) et à droite : la gare de Louvain-la-Neuve (architectes : Y. Lepère et J. Polet ; photo : S.Reiter).

La bonne attitude de conception est donc de considérer le projet urbain ou architectural comme une actualisation d'un état existant par l'inscription d'un fragment contemporain. Pour ce faire, l'articulation et la continuité semblent deux moyens architecturaux particulièrement adaptés.

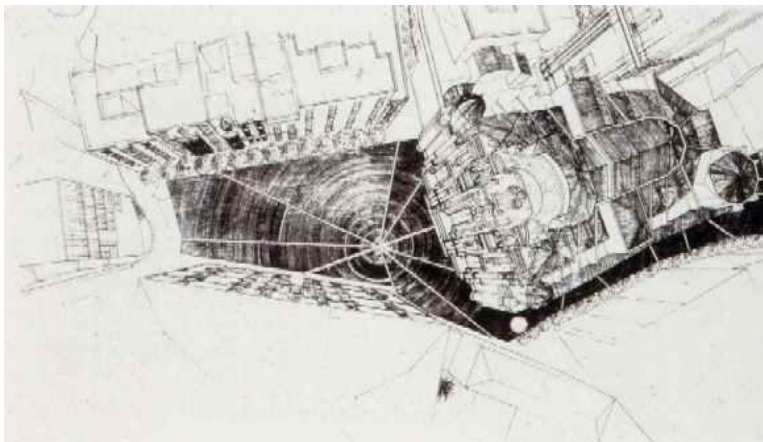
S'intégrer, c'est tenir compte du passé pour comprendre le présent et construire le futur. L'architecture permet, par sa permanence, d'assurer une continuité entre différentes générations. Michel Corajoud précise ces propos : « *Pour faire un projet, vous devez entrer dans son mouvement, dans sa dynamique. Pour anticiper, vous devez d'abord reconnaître les inscriptions antérieures du lieu, ses modes successifs d'occupation, ses inclinaisons. C'est souvent dans la mémoire des lieux que gisent des valeurs sûres à partir desquelles peut se fonder une proposition nouvelle.* »

Nous allons analyser en détail un très bel exemple de l'intégration d'un bâtiment contemporain à un contexte urbain existant : la place Belluga. L'hôtel de ville de Murcia, conçu par R. Moneo, y est un exemple remarquable d'architecture urbaine contextuelle. L'architecture y régénère l'urbain, en valorisant le passé tout en relançant l'avenir...



L'hôtel de ville de Murcia (Architecte : R. Moneo ; photo : El Croquis n°98, 1999).

L'hôtel de ville de Murcia, en Espagne, est situé sur une place trapézoïdale, à l'emplacement d'une maison baroque effondrée. La place Belluga est une très belle place en longueur, bien orientée: le côté face au sud est d'ailleurs bordé de restaurants et de terrasses bien exposées au soleil. Le lieu est fortement marqué par la présence d'une cathédrale baroque ainsi que par le Palais de l'Archevêque Belluga, situé en face des restaurants, où s'inscrit une belle loge à la mode papale. Il faut également insister sur les rayons du pavement de la place qui semblent relier les différents bâtiments.



Pavement reliant les différents bâtiments (El Croquis n°98, 1999)

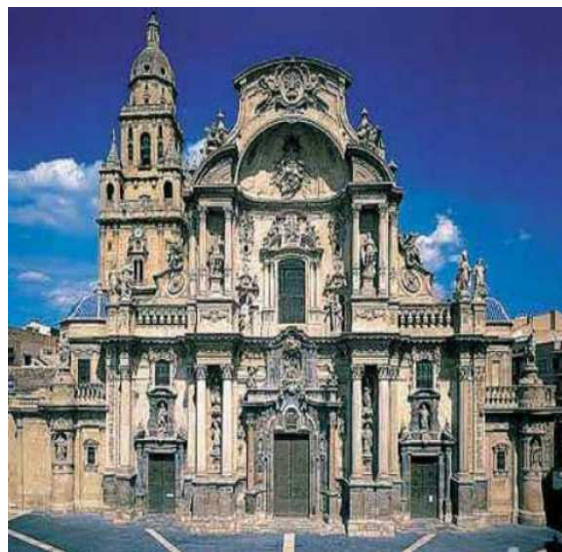
Bien que le tracé de l'ancienne maison baroque est littéralement conservé sous la forme d'un muret bas, Moneo referme la place en proposant un bâtiment dont la façade est plane. Ainsi, il reconstitue la continuité des limites de cette place, tout en préservant la trace du passé, mais il y instaure un nouvel ordre, en initiant un lien de face-à-face entre la cathédrale et la mairie. Cette mise en présence contemporaine renforce la signification du pavement qui fait de cette place le centre de la ville de Murcia. Le muret qui conserve le souvenir de l'emplacement

de la maison baroque initiale permet aussi d'ouvrir un escalier vers un parvis, en contre-bas de la place Belluga, par lequel on accède à la salle publique. Ainsi, la hauteur de la mairie coïncide avec la hauteur des autres bâtiments du pourtour de la place et l'entrée de la mairie n'est pas en confrontation avec celle de l'église.



(Architecte : R. Moneo ; photo : El Croquis n°98, 1999).

Dans la façade de son projet, Moneo se réapproprie un motif architectural de chacun des deux monuments de la place: la loge de l'archevêque et la verticalité mouvementée de la façade de la cathédrale. La façade de l'extension de la mairie se dresse tel un mur de pierre qui se perce graduellement pour devenir dentelle de pierre à proximité du ciel. Sur la photo de gauche, notez la « loge mayorale » (baie sur deux niveaux permettant à une salle de réception de s'ouvrir largement sur la place) et le jeu mouvementé de piliers de pierre et des dalles de béton qui font écho de manière très contemporaine à la fluidité de la structure baroque de la cathédrale (photo de droite).



Hôtel de ville (architecte: R. Moneo) et cathédrale de Murcia (photos: El Croquis n°98, 1999).

En outre, Moneo crée une galerie, espace interstitiel entre les locaux de la mairie et le pan mural de sa façade. Cet élément renforce le dialogue entre la cathédrale et la mairie, tout en soulignant le superbe travail d'épaisseur de la façade de la cathédrale baroque.



Galerie de l'hôtel de ville de Murcia (Architect : R. Moneo; photo : El Croquis n°98, 1999).

Toutefois, la sobriété et la planéité de ce mur de pierre préserve le rapport de dominance de la cathédrale sur l'ensemble des bâtiments de la place et inscrit la mairie dans un rapport de convivialité avec le palais de l'Archevêque car cette galerie se situe dans un même plan horizontal que le balcon central de la façade du palais Belluga.

Le matériau utilisé pour la construction de la mairie est la pierre, comme tous les autres bâtiments de la place. De plus, la pierre utilisée s'inscrit dans la tonalité des bâtiments de la place.

L'implantation et l'architecture du bâtiment de la mairie s'intègrent donc parfaitement dans ce morceau de ville, en reprenant, en complétant et en actualisant un geste commencé trois siècles plus tôt. Moneo invente un dialogue sublime entre innovation et tradition. Son écriture architecturale est résolument contemporaine, tout en s'inscrivant dans la tradition architecturale, historique et culturelle de la ville de Murcia.

Ainsi, la place Belluga nous prouve qu'il est possible d'intégrer un bâtiment dans son contexte sans pour autant créer une architecture passe-partout basée sur le camouflage et le mimétisme. En revanche, réaliser une œuvre d'art architecturale ne nécessite pas une attitude orgueilleuse ou provocatrice en rupture volontaire avec le voisinage.

Le rôle de l'architecte est celui de décrypter les clés qui permettront une relecture intéressante du site en se basant sur sa sensibilité, son originalité et son enthousiasme, tout en conservant toujours une bonne dose de modestie. Lorsque le projet s'inscrit dans un lieu historique ou un environnement déjà bâti de qualité, l'attention portée à créer un dialogue entre l'ancien et le nouveau est spécialement importante pour conserver un site harmonieux.

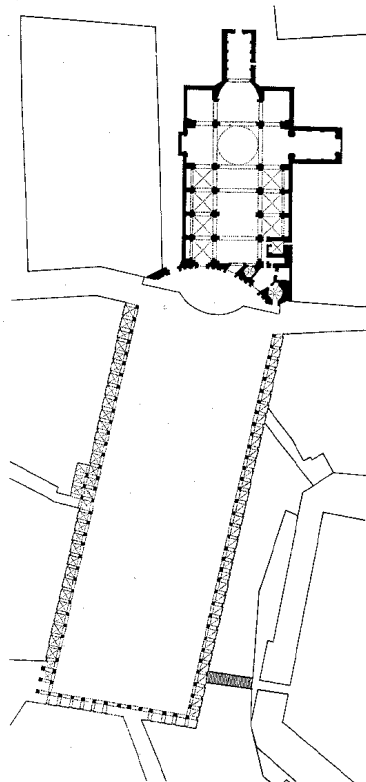
Le développement durable de l'humanité nécessite de mettre en application l'adage *«penser globalement et agir localement »*.

1.2.2 La participation

Chaque aménagement exerce un effet, bon ou mauvais, sur le milieu ambiant. La participation d'un lieu consiste à apporter des bénéfices au milieu dans lequel il s'inscrit et à le protéger de toute nuisance qu'il pourrait induire.

Apporter sa part d'énergie créatrice à une cause commune, tel est en effet la philosophie de la participation. Tout bâtiment, dit Kahn, « *doit donner quelque chose à la rue* ». Mais l'architecture ne pourra jamais se substituer à l'urbain dans son rôle de contexte construit car « *c'est la première fonction du projet urbain que de définir un contexte en amont de l'architecture.* » (Gilot 1999)

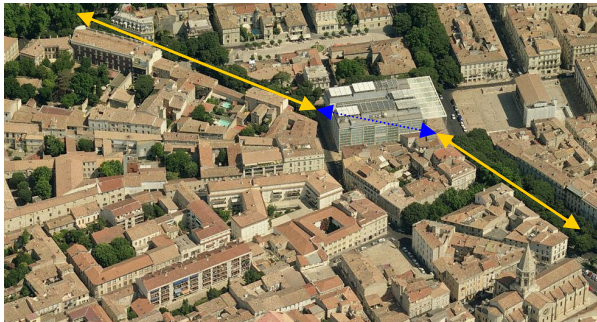
Un exemple splendide de la participation d'un bâtiment à un espace public pour former un milieu cohérent est donné par Pierre von Meiss dans son livre 'De la forme au lieu' : « *Lorsque le château de Vigevano est devenu la résidence d'été des Sforza, on lui a taillé une antichambre dans le tissu médiéval cerné sur trois côtés par une colonnade, le quatrième recevant les rampes d'accès d'honneur au château (1492-1494). Presque deux cents ans plus tard (1676-1684), on décide d'ériger la cathédrale Saint-Ambroise sur ce quatrième côté. La géométrie de la parcelle ayant un rapport gauche avec la place, les architectes décident d'accorder à la façade une autonomie en faveur de son rôle urbain. Son rayonnement frontal embrasse la dimension de la place toute entière. Pour y parvenir, la façade empiète même sur un édifice voisin.* » (von Meiss 1993). Le plan et la photo ci-dessous illustrent cet exemple remarquable.



La cathédrale Saint-Ambroise à Vigevano (plan et photo : von Meiss 1993).

Il ne s'agit pas, dans cet exemple, de l'intégration de la cathédrale dans une structure spatiale prédéfinie mais bien de sa participation active dans l'élaboration commune de la place. Si la forme de la façade se plie à l'espace public, la cathédrale en tant que monument domine toutefois la place. L'espace public et le bâtiment bénéficient donc l'un et l'autre de cet assemblage.

Un exemple contemporain du principe de participation est le Carré d'Art à Nîmes. Ce bâtiment, conçu par Sir Norman Foster fait face à La Maison Carrée, l'un des fleurons antiques de Nîmes. Le Carré d'art abrite à la fois un musée d'art contemporain et une bibliothèque. La création de ce lieu culturel, devenu incontournable, a permis de renforcer l'activité culturelle de la ville et de revitaliser le centre-ville. De plus, grâce à ses entrées situées en diagonale de part et d'autre du bâtiment, à la conception minimaliste du plan du rez-de-chaussée et à sa transparence (atrium et façades vitrées), le Carré d'Art est traversé par de nombreux citadins qui l'utilisent en raccourcis entre deux axes importants de Nîmes (flèches jaunes). Il s'agit donc d'un bâtiment qui offre en son sein un passage pour piétons (pointillés bleus) assurant une liaison entre ce lieu de référence et deux quartiers de Nîmes.



Carré d'Art (architecte: S. N. Foster) et Maison Carrée à Nîmes.
(Photo : Microsoft Virtual Earth).

Ci-dessous, les photos d'une bibliothèque municipale de Vienne. Ce bâtiment situé entre deux boulevards offre un bel espace public pour les piétons, regroupant la toiture plate et un escalier monumental. Ainsi, dans un lieu où le piéton pouvait se sentir exclu, ce bâtiment apporte une qualité spatiale et conviviale.



Bibliothèque municipale à Vienne (Photos : K. De Myttenaere)

Tout lieu public doit participer à son milieu à travers ses contextes physique, construit et humain. L'aménagement urbain dépend de cycles longs, qui dépassent de loin l'existence d'une génération humaine. Il pose donc intrinsèquement la question de la justice intergénérationnelle. La participation induit une prise de position éthique. Ce principe implique d'accepter de recevoir la Terre (ses ressources, son climat, ses civilisations, ...) comme un don transmis par les générations précédentes et dont on serait les dépositaires transitoires vis-à-vis des générations futures.

Dans le cadre du développement durable, les stratégies d'intégration au contexte sont nécessaires mais elles ne sont plus suffisantes. Les concepteurs de projets doivent également tenir compte de la manière dont ils peuvent apporter des avantages au milieu et le protéger. Ainsi, les stratégies bioclimatiques qui profitent des avantages du climat local et se protègent de ses contraintes doivent être complétées par des stratégies bénéfiques pour le milieu. Par exemple, le choix de la localisation d'un bâtiment en ville pour limiter les nuisances environnementales et la participation à la formation d'un microclimat urbain de qualité sont des critères indispensables pour une architecture qui se veut durable. D'autre part, tout bâtiment devrait rechercher un avantage maximal pour chaque unité de ressources consommées et de déchets produits, afin de limiter la pollution qu'il génère et ainsi protéger la planète. Notre responsabilité face à l'environnement urbain nécessite de développer des modes de vie, des modes de production et des modes de consommation non polluants.

Il est important d'admettre que l'environnement peut imposer des seuils écologiques à certaines activités humaines et que, parfois, aucun avantage ou profit potentiel ne peut contrebalancer l'épuisement d'une ressource naturelle ou la dégradation de l'environnement. Il est capital, pour le bien-être et la survie de l'humanité, que l'environnement reste capable de fournir des ressources, d'absorber des déchets et de remplir ses fonctions vitales. Si nous sommes privés d'un air suffisamment pur à respirer, d'eau potable en abondance, d'une atmosphère qui nous protège des radiations dangereuses ou d'une bonne terre et d'un climat qui nous permettent de produire des aliments en suffisance, il est peu probable qu'une combinaison quelconque d'autres avantages nous semble capable de compenser une telle perte. Or, de plus en plus d'éléments indiquent que nous sommes en train, ou que nous risquons, de franchir des seuils cruciaux en ce qui concerne la capacité de charge de notre globe (CEE 1996).

L'analyse du cycle de vie d'un matériau mesure l'impact environnemental de la vie d'un produit, depuis sa réalisation jusqu'à sa destruction ou son recyclage. D'un point de vue urbain, les quartiers peuvent être abordés sous l'angle de l'empreinte écologique, qu'il conviendra de minorer, comme cela s'est fait à BedZED. Ceci renvoie aux notions de capacité de charge, de seuils, de capital naturel et de cycle des ressources d'un espace à urbaniser.

Le quartier BedZED dans la banlieue londonienne est un quartier dont l'empreinte écologique est réduite de 50% par rapport à des scénarios types appliquant des ratios moyens liés aux modes de vie et à l'usage des bâtiments. Pour donner un ordre de grandeur, comparativement à des habitations classiques, le chauffage y est réduit de 90%, la consommation totale énergétique de 70% et le volume des déchets de 75%. Pour atteindre cet objectif ambitieux, les concepteurs de BedZED ont réalisé une large analyse de cycle de vie du quartier, de la construction des logements aux différents besoins en ressources énergétiques, en passant par les

transports, les activités professionnelles, la vie sociale et culturelle, la gestion des déchets, la gestion de l'eau...

Les photos ci-dessous montrent des bâtiments et des espaces publics de BedZED, quartier dont l'empreinte écologique a pu être diminuée de moitié par son analyse de cycle de vie.



BedZED (photo : IMBE 2005)



BedZED (photo : IMBE 2005)

Vu que la science ne permet pas toujours d'établir avec précision les seuils écologiques, il est indispensable d'appliquer le principe de précaution. Un tel mode d'action privilégie une approche préventive plutôt que curative. Mieux vaut, par exemple, limiter la production de déchets plutôt que d'augmenter leurs capacités de traitement. Dans la mesure du possible, l'action doit porter sur les causes plutôt que sur les conséquences des problèmes engendrés sur le milieu.

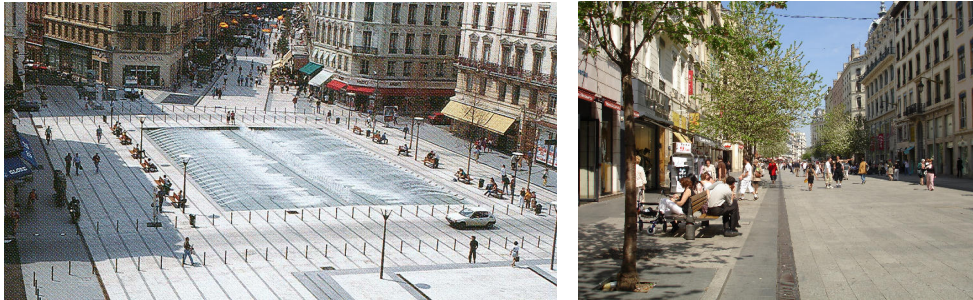
Citons quelques principes de conception indispensables pour limiter l'empreinte écologique de nos urbanisations :

- réduire l'utilisation d'énergie des bâtiments (isolation, stratégies URE, microclimat urbain,...)
- réduire l'utilisation d'énergie du transport en augmentant la densité construite, en améliorant la distribution des transports en commun et en assurant des cheminements confortables pour les piétons et les cyclistes.
- favoriser l'utilisation de l'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable.

On voit dès lors que le microclimat urbain est un des paramètres essentiels dans une politique de réduction de l'empreinte écologique de notre pays, puisqu'il influence fortement les consommations énergétiques des bâtiments, l'utilisation de transports écologiques et la possibilité de profiter des énergies renouvelables.

Avec plus de 300 opérations réalisées en moins de 15 ans et une approche globale des problèmes qui concernent les rues et les places du centre urbain, les grandes cités de logement, les centres de village et les sites liés aux infrastructures de transports, Lyon constitue un véritable laboratoire urbain et une référence européenne en matière d'aménagement de l'espace public. La politique d'aménagement des espaces publics mise en place dans le Grand Lyon a eu pour effet de provoquer un certain « retour en ville » dans la zone centrale de Lyon (à l'intérieur du périurbain). Cette évolution est perceptible depuis 1995 alors que les premières opérations datent de 1989. (Gillon 2002)

Les photos ci-dessous montrent la rénovation de la place et de la rue de la République, espaces publics majeurs du centre ancien, réaménagés pour les piétons.



Place et rue de la République à Lyon. (Rénovation : A. Sarfati).
(Photo de la place : J.-M. Gillon ; photo de la rue : S. Reiter)

La photo ci-dessous montre au sein de la « Montée de la Grande Côte », l'aménagement d'un intérieur d'îlot en jardin public dans un quartier populaire surplombant la ville ancienne. (Gillon 2002)



Jardin de la Montée de la Grande Côte à Lyon.
(Photo de gauche : J.-M. Gillon ; photo de droite : S. Reiter).

Il faut noter que la politique menée à Lyon en matière d'habitat urbain et de réaffectation des friches industrielles a contribué pour une part non négligeable à ce retour en ville, notamment par le réaménagement des anciennes industries textiles et mécaniques de la banlieue Est. (Gillon 2002)

A l'heure où l'on cherche des alternatives à l'étalement urbain et où l'on ressent la nécessité de redynamiser les fonctions centrales des grandes villes, les **friches industrielles urbaines** constituent souvent une opportunité majeure pour :

- offrir une capacité résidentielle au centre des agglomérations,
- accueillir des activités économiques nouvelles, compatibles avec la densité et la mixité urbaines,
- proposer des projets respectueux de l'homme et de la nature,
- concevoir l'espace public en ville de manière innovante,
- proposer de nouveaux types de moyens de transport,
- assurer la biodiversité grâce à des espaces verts de grande taille pénétrant à l'intérieur des villes,
- tester la possibilité de créer des projets avec la participation des citoyens.

Le projet de « l'île de Nantes » est un exemple impressionnant de renouvellement urbain dont l'objectif est de faire revivre une friche industrielle d'une surface de 350 hectares, née de l'arrêt des chantiers navals à la fin des années 80 en associant étroitement les habitants au débat.

L'île de Nantes est un maillon essentiel pour retisser les relations entre la ville de Nantes, le fleuve et l'estuaire. Recomposer ce territoire hétérogène en un véritable cœur d'agglomération, en préservant les éléments de mémoire du site, représente un véritable enjeu pour les concepteurs Alexandre Chemetoff et Jean-Louis Berthomieu.



L'île de Nantes (Escudero 2004).

Kronsberg est un quartier de 6300 habitants construit sur un ancien site industriel en périphérie de la ville de Hanovre en Allemagne, où l'on ne consommerait annuellement que 55 kWh/m² alors que la moyenne locale est de 100 kWh/m² pour les immeubles construits en 2000 et de plus de 220 kWh/m² pour les autres. Il faut y ajouter les réseaux de co-génération assurant l'alimentation du chauffage urbain et de l'eau chaude ainsi que deux éoliennes produisant respectivement 1.5 et 1.8 Mégawatts. Au final Kronsberg consomme moins d'électricité qu'il n'en produit et rejette un volume de CO₂ inférieur de 55% à celui d'un quartier classique. (IMBE 2005)



Quartier Kronsberg (IMBE 2005)



Quartier Kronsberg (IMBE 2005)

Le Livre vert sur l'environnement urbain nous appelle à la responsabilité : *« Assumer la responsabilité des conséquences d'un acte à tous les niveaux – individu, sociétés et pouvoirs publics – est une condition préalable essentielle de l'amélioration de l'environnement. »* (CEE 1990). Il faut développer des modes de vie, des modes de production et des modes de consommation non polluants.

Le principe de responsabilité débouche par exemple sur le principe pollueur-payeur qui veut notamment que les responsables des nuisances et pollutions ou des destructions d'écosystèmes soient ceux qui assument les coûts de ces atteintes à l'environnement et non qu'ils soient pris en charge par la collectivité. A un niveau

macro-économique, l'idéal serait de parvenir à internaliser ces coûts, c'est-à-dire à les intégrer dans les prix. Les biens environnementaux sont en effet le plus souvent considérés comme gratuits ; leur coût d'exploitation et le coût de leur destruction ne sont pas pris en compte dans les prix ce qui conduit à une mauvaise allocation des ressources. Les taxes foncières et travaux publics devraient, par exemple, être conçus pour encourager la consolidation des villes plutôt que leur étalement : cela augmenterait la relative compétitivité de la ville compacte et soutiendrait le développement des centres-villes.



Le principe de responsabilité : valorisation et solution pour la ville compacte (Photos : S.Reiter)

Enfin, du point de vue du développement durable, le seul contexte environnemental n'est pas suffisant. Il faut aussi tenir compte en permanence des implications sociales et économiques de chaque décision. Par exemple, l'utilisation de matériaux locaux permet de limiter les consommations d'énergie dues à leur transport mais une réflexion plus large encore peut être menée sur la valorisation de la main d'oeuvre locale, voire sur l'appel à des organismes locaux d'insertion professionnelle...

Le quartier Vauban à Fribourg a été conçu dans un but de développement durable. Le tableau ci-dessous compare pour différents indicateurs du développement durable les performances atteintes dans le quartier Vauban et la valeur de référence théorique pour un quartier de taille identique intégrant le même type d'équipements mais réalisé sans aucune mesure écologique spécifique (IMBE 2005).

Indicateurs de succès	Référence	Vauban	ΣΣ
Dimension économique			
Part d'énergies primaires locales	24%	49%	+ 83%
Part d'énergies primaires renouvelables	7%	45%	+ 503%
Part de matériaux de construction locaux	12%	20%	+ 67%
Part d'entreprises régionales dans la construction du quartier	-	50%	↗
Nombre de véhicules pour 1 000 hab.	960	450	- 53%
Dimension écologique			
Part d'espaces verts dans le quartier (m²/hab)	29	16	- 45%
Infiltration des sols ha/surface totale	27%	27%	0
Recyclage des déchets (hors gravats)	70	Non renseigné	→
Equivalence CO ₂ (en tonnes/an)	11.952	9.396	- 21%
Besoin de ressources énergétiques (GJ/an)	180 858	165.040	- 9%
Besoin de ressources en matériaux bruts (t/an)	4 194	2.434	- 42%
Déchets ménagers (kg/hab./an)	303 (1997)	303	0
Consommation d'eau (l/hab./jour)	129 (1998)	115	- 11%
Dimension sociale			
Offre de produits du commerce équitable	Non	Oui	↗
Part des logements sans place de parking	<1%	~ 70%	+ 7 000%
Part des transports en commun dans les personnes.km en %	24%	~50%	+ 100%
Taux d'occupation des places de crèches	100%	100%	→
Constructions adaptées aux handicapés	1%	4%	+ 300%
Nombre d'offre de loisirs et de formation extra-scolaire pour les enfants et jeunes du quartier	Non	Oui	↗
Equipements pour "auto-gestion" (centre citoyen)	Non	1 500 m ²	↗
% des rues accueillant les jeux d'enfants	-	55%	↗

Source : Institut d'Écologie Appliquée. Étude "Quartiers durables dans les zones urbaines en reconversion : analyse des flux de matière comme instrument d'évaluation".

Le surcoût des mesures environnementales prises en compte pour la conception du quartier Vauban est évalué entre 3% et 5% maximum.



Quartier Vauban (IMBE 2005)



Quartier Vauban (IMBE 2005)

Prendre en compte les critères sociaux est indispensable pour tout aménagement urbain durable et cela passe notamment par une distribution équitable des services et des zones de détente ainsi qu'un accès à tous les lieux publics offerts à l'ensemble des citoyens. La qualité de l'expérience urbaine offerte est un élément social extrêmement important. De manière plus précise, tenir compte du contexte social, c'est chercher à identifier et à valoriser les préférences, les habitudes, les références culturelles des différents utilisateurs potentiels de l'espace, afin de favoriser les éléments qui vont dans le sens d'une plus grande appropriation de l'espace par les différentes populations habitant notre pays. D'autre part, les activités et lieux offerts devraient être pensés pour favoriser à la fois le bien-être individuel, la possibilité de se rencontrer ou de se réunir entre amis, familles,... ainsi que de se sentir appartenir à une communauté. Pour cela, il faut par exemple offrir des espaces de détente mais aussi des espaces de contact (barbecue, plaines de jeux,...) et des lieux de fête ainsi qu'une plus grande participation des habitants à l'aménagement de leur territoire.

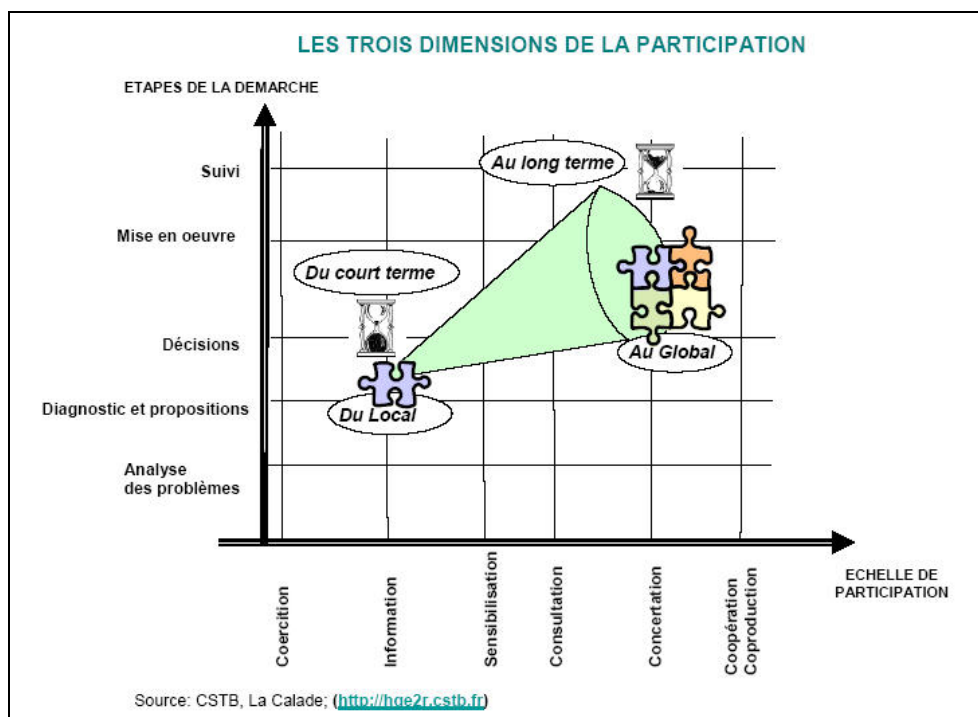
Une des raisons de la faiblesse du dynamisme collectif urbain et du contrôle social se trouve dans la médiocre participation des habitants des villes modernes surtout des grandes villes à la vie publique urbaine. La recherche de la durabilité exige une conscience plus profonde de notre responsabilité collective vis-à-vis de la Terre et des générations futures. Chaque homme est citoyen du monde, habitant d'une même planète et membre de la communauté humaine. Toutes les couches de la société doivent donc avoir leur mot à dire dans les décisions concernant les besoins du développement durable et les mesures à prendre pour l'atteindre.

Les sondages d'opinion indiquent invariablement un intérêt énorme pour les questions de développement durable. Cependant, un fossé aussi immense existe entre l'intérêt exprimé et la volonté d'agir pour changer les choses (CEE 1996). A longue échéance, seule une prise de conscience générale des problèmes et des solutions assurera la pérennité du changement. La sensibilisation suppose que l'on se concentre sur des facteurs qui motivent les gens, et surtout que l'on montre l'importance des enjeux du développement durable pour la vie quotidienne de chacun. La sensibilisation doit aller de pair avec le renforcement de la participation. Si l'on fait naître le désir d'agir, il faut fournir les moyens nécessaires pour l'assouvir. Autrement, le sentiment d'impuissance que beaucoup éprouvent déjà s'accroîtra et le développement durable en souffrira à longue

échéance. L'accès et la diffusion de l'information servent les objectifs démocratiques et doivent être axés sur les usagers.

La participation des citoyens est importante : ils doivent être des acteurs dans la prise de décision afin de localiser les alternatives à l'échelle du milieu, faciliter la prise en compte des particularités locales (aussi bien culturelles, environnementales que politiques et économiques) et permettre l'appropriation des choix devenus collectifs. En effet, la participation des citoyens remplace les décisions urbanistiques dans leur contexte local. Ensuite, les citoyens devenus acteurs du projet urbain ont plus facile à s'approprier les choix collectifs, ce qui les aide à prendre conscience qu'ils sont responsable de leur environnement. La participation citoyenne garantit le fait que tous les points de vue auront été entendus et permet au projet de s'articuler à partir de la pluralité des besoins des acteurs locaux et de la collectivité à une échelle plus importante (ville, pays,...), ce qui fait de l'urbanisme une construction démocratique de notre environnement construit. Ainsi, la participation citoyenne garantit la diversité des solutions et la diversité des points de vue.

Le schéma ci-dessous provient de la méthode HQE2R, qui se définit comme une démarche pour intégrer le développement durable dans les projets d'aménagement et de renouvellement urbains. La méthode HQE2R définit six niveaux de participation citoyenne : coercition, information, sensibilisation, consultation, concertation, coopération-coproduction.



Le point de départ de tout processus de participation est d'élever le niveau de connaissance, de sensibilisation et de conscientisation de la population : informer et éduquer constituent la première étape de toute démarche de participation. Ensuite, la participation s'étend à l'écoute des habitants et des usagers, la prise en compte des besoins et des attentes des habitants et des citoyens. A ce niveau, l'expression de la population doit aider à définir les cibles prioritaires pour un projet d'urbanisme. Une véritable participation commence avec la concertation qui offre aux habitants une réelle possibilité de négociation. Les processus de coopération, les plus participatifs, débouchant sur une coproduction, nécessitent des règles

préalables à la concertation des différents acteurs. La participation des habitants et des usagers devrait idéalement évoluer dans le cadre d'un processus d'apprentissage et d'acquisition des connaissances sur l'architecture, l'espace public et la ville dans leurs points de vue multidisciplinaires.

Pour pouvoir assurer des processus de participation des habitants, il est essentiel que chaque habitant se sente appartenir au quartier où il habite. Ce sentiment peut être renforcé par des politiques d'information et de stimulation de la conscience citoyenne, en particulier en ce qui concerne les enjeux d'un quartier par rapport au développement durable. Il est également important d'informer les habitants sur les limites de leur participation (du point de vue du coût du projet ou des objectifs de la ville) afin d'éviter des réactions de déception. Dans des projets importants, il est recommandé de créer un centre d'information ouvert au public où les personnes peuvent recevoir des informations et poser leurs questions ou créer des structures de communication telles que la diffusion régulière d'informations sur le projet par une chaîne locale de télévision, des brochures distribuées aux habitants, des soirées d'information, ...

L'information et la sensibilisation des différents acteurs sont indispensables pour la réussite d'aménagements urbains durables. Lors de la conception ou de la rénovation de quartiers, il est judicieux de mettre en place des lieux d'échanges et de diffusion de l'information sur différentes thématiques liées au développement durable. Ce type de mesures ont déjà été prises dans différents projets urbanistiques contemporains visant le développement de quartiers durables ; citons : l'agence Kuka et KroKus à Kronsberg, le Forum Vauban à Fribourg, le Centre d'information environnementale GlashusEtt à Hammarby Sjöstad, le Centre pour la rénovation de Vesterbro et le Centre d'information de BedZED. Cette information doit être soignée et destinée au grand public, aux enfants, aux étudiants, aux divers milieux professionnels et associatifs. Les moyens de diffusion sont multiples : plaquettes, dépliants, documents, expositions, outils pédagogiques mais aussi réseau Intranet, télévisions de quartier, sites Internet.

Dans le quartier Kronsberg de la ville d'Hanovre, l'agence Kuka a réalisé des actions assez variées :

- l'édition de publications diverses (prospectus, bulletins d'information avec notamment le magazine de quartier «La vie de Kronsberg», fiches informatives et circulaires),
- l'organisation de débats, discussions, événements, séminaires, ateliers,
- l'élaboration de conseils personnalisés,
- la réalisation de formations et de supports visuels (affiches, expositions, diaporamas et vidéos clips),
- la présentation en ligne sur Internet,
- la mise en place de procédures de concertation publique.

L'information et la formation sont des outils indispensables à une bonne gouvernance. Elles permettent aux populations locales d'intégrer, en qualité d'éco-citoyens et utilisateurs des aménagements réalisés, les principes du développement durable dans leurs comportements et leurs modes de vie. La constitution et l'organisation d'un système global d'information et de communication sur le développement durable nécessitent un financement spécifique qu'il convient d'intégrer dès le démarrage d'une opération d'aménagement et qu'il est indispensable de pérenniser dans le temps. En effet, très souvent, les dispositifs d'information, de constitution des réseaux, de collectes des données sont financés

dans la phase initiale du projet mais leur actualisation et leur animation ne sont pas reconduites dans la durée.

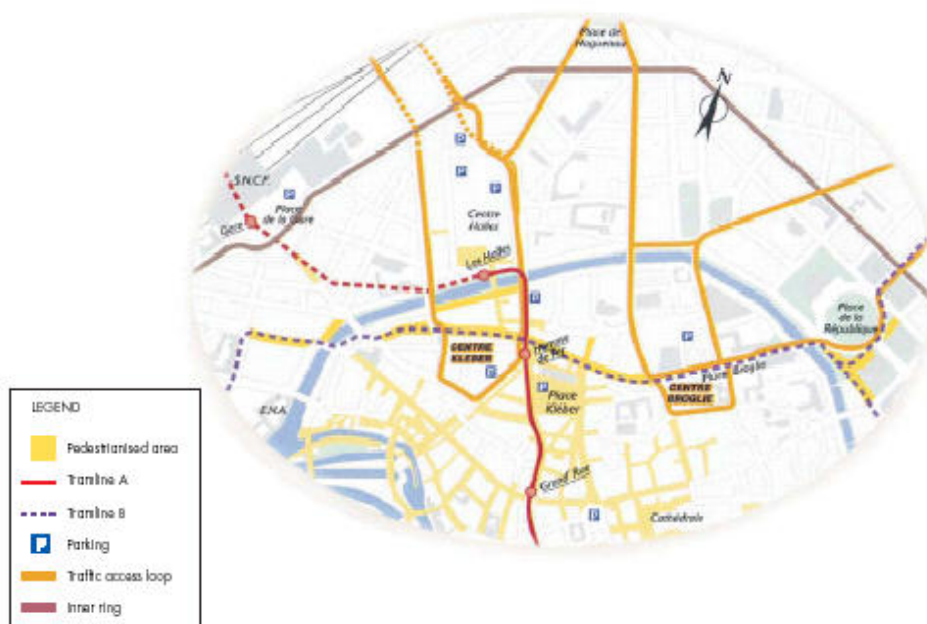
Dans de nombreux exemples de projets urbains de réduction de la voiture en ville, les concepteurs et les politiciens ont rencontré dans un premier temps une opposition forte de la part de la population. Or, dans la plupart des réalisations de ce type, après une première période d'adaptation, la population est généralement très favorable par rapport aux changements effectués. Ces projets ont donc permis de tirer des leçons sur l'importance d'une longue période de consultation et de campagnes de communication extensives. (CEE 2004b)

Début des années 1990, un plan de mobilité a été conçu pour limiter l'utilisation de la voiture privée à Strasbourg et favoriser l'utilisation des transports en commun, du vélo et de la marche à pied. Une grande zone centrale est devenue piétonne et deux lignes de tramway ont été créées.

En 1990, avant l'implantation de ce projet, le nombre de véhicules dans le centre ville était approximativement 240 000 véhicules/jour. En 2000, il ne s'élève plus qu'à 200 000 véhicules / jour, soit une diminution de 16% du trafic automobile. De plus, les modèles d'évaluation et de prédiction du trafic suggèrent que sans cet aménagement urbain il y aurait aujourd'hui plus de 300 000 véhicules par jour dans le centre de Strasbourg, ce qui correspond à une augmentation de 25% du trafic automobile. Ce projet a abouti à un important transfert modal de la voiture vers des modes de transport plus écologiques. En 1989, 72.5 % des voyages étaient réalisés en voitures individuelles et 11% en transports en commun. En 1999, 60% des voyages étaient toujours réalisés en voitures mais 30% étaient réalisés en transport en commun. (CEE 2004b)

Le plan ci-dessous montre l'étendue de la zone piétonne ainsi que le tracé des voies des nouveaux tramways à Strasbourg.

STRASBOURG CITY CENTRE



Plan du centre de Strasbourg (CEE 2004b).

La réussite de cette transformation de la mobilité urbaine à Strasbourg est principalement due à la qualité des aménagements réalisés et des espaces publics créés ainsi qu'au processus de sensibilisation des habitants. Les photos ci-dessous montrent la qualité de l'implantation du nouveau tramway à Strasbourg.



Tramway A – Place de l'Homme de Fer, Strasbourg (CEE 2004b)

Toutefois, avant la mise en place des tramways et de la zone piétonne étendue, de nombreuses oppositions de la population et notamment des commerçants ont vu le jour à Strasbourg. C'était la première fois qu'une ville française de cette taille et de cette importance bousculait les habitudes de ses habitants à ce point. Les autorités de la ville ont alors réalisé un processus de consultation étendu et ont lancé une campagne de sensibilisation active en collaboration avec les opérateurs de transport en commun. L'opposition forte à ce projet a progressivement laissé la place à une acceptation positive de cette intervention politique à grande échelle. Par ailleurs, le projet n'a causé aucune diminution de revenus pour les commerçants du centre-ville et certains ont même largement augmenté leurs rentrées. (CEE 2004b)



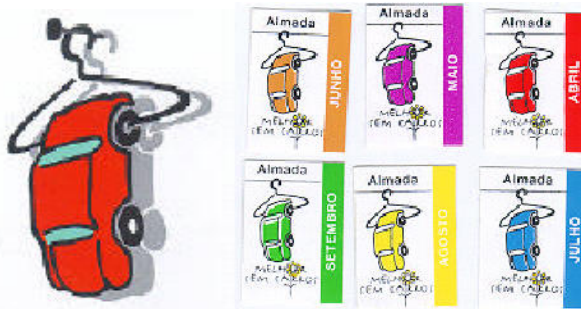
“Bruno”, symbole de la communication active réalisée à Strasbourg. (CEE 2004b)

La réduction du nombre de voitures dans le centre de Strasbourg a permis de redonner des espaces de qualité aux piétons et cyclistes. La place Kébler, par exemple, située dans le centre historique et qui était traversée par 50 000 véhicules par jour, a été rénovée et est devenue un lieu important du centre-ville depuis qu'elle est devenue piétonne. (CEE 2004b)



Place Kébler (CEE 2004b)

La qualité des efforts en termes de communication et d'image peuvent fortement influencer les résultats d'une campagne de sensibilisation. Un bel exemple est celui du projet "Better without my car", coordonné par IDAE (Agence espagnole de l'énergie) de novembre 2000 à décembre 2001. Ce projet avait pour objectif de réduire la consommation d'énergie dans les transports urbains en rationalisant l'utilisation des véhicules individuels et en permettant l'utilisation plus forte des transports publics. L'idée était de montrer aux habitants qu'ils sont une des clés principales du problème, permettant ainsi de renforcer une culture participative. Les supports de communication pour mettre en œuvre cette campagne ont été très variés afin de toucher le plus grand nombre : journaux et publicités, spots TV, posters, brochures, auto-collants pour les voitures participant au projet, matériels de marketing tels que tee-shirts, sacs en tissus, etc. Les schémas ci-dessous montrent le look attractif qui a été choisi. (ADEME 2002)



(ADEME 2002)

Les processus participatifs plus avancés sont basés sur un diagnostic initial qui s'accompagne de la définition d'objectifs, associés à des indicateurs permettant une évaluation continue aux différentes phases de l'aménagement. À Vesterbro, une équipe de consultants (architectes, sociologues, animateurs de quartier, assistants sociaux) de type coopératif a ainsi planifié les axes et les objectifs généraux et formulé une liste de priorités par blocs d'immeubles. À l'issue d'une présentation aux résidents, ces derniers bénéficiaient d'un délai de huit semaines pour faire connaître leurs objections au projet et leurs suggestions. Après cet échange, les concepteurs ont défini des plans d'action par îlots en intégrant les remarques des citoyens. Ce processus de concertation a duré environ un an.

La conception du quartier Vauban à Fribourg a connu une forte participation citoyenne. L'un des éléments les plus intéressants dans la constitution de la vie associative du quartier a été la création du *Forum Vauban*, une association privée et démocratique ouverte à toute la population du Quartier Vauban et qui a compté 250 membres. La participation citoyenne prévue pour le quartier Vauban a dépassé les simples concertations imposées par les réglementations actuelles. Fribourg a organisé une participation citoyenne élargie, qui a été constante pendant cinq années, depuis le concours d'idées jusqu'à l'élaboration du projet et le début des travaux.

Un groupe d'experts pluridisciplinaire (juriste, biologiste, urbaniste, physicien, géographe, économiste, expert bancaire, technicien de l'environnement), financés par la Fondation allemande pour l'environnement, la ville de Fribourg et le programme Life, ont été associés au Forum Vauban afin d'accompagner et d'animer les groupes de travail des habitants, de formuler des conseils et des recommandations techniques aux futurs habitants ainsi que de conseiller le groupe de travail communal chargé de suivre le développement du nouveau quartier. Sa

mission première d'informer les citoyens a conduit le Forum Vauban à éditer un magazine de sensibilisation à la conception et au suivi des actions associées à ce quartier. Ce médium a également servi de support publicitaire pour renforcer l'identité du quartier et attirer de nouveaux habitants.

La ville de Fribourg a privilégié le dialogue, même si parfois il s'est avéré complexe : près de 10 à 15% des décisions sont restées conflictuelles et ont dû être tranchées par la mairie. Par la participation citoyenne élargie, la ville a pris le parti de travailler main dans la main avec les futurs habitants, afin d'établir avec eux un cahier des charges du quartier (urbain et architectural). Les habitants ont ainsi fait valoir leurs convictions et leurs idées. Le projet Vauban a été continuellement adapté aux résultats des concertations, ce qui a permis à la municipalité de Fribourg de faire évoluer le projet et de l'améliorer au fur et à mesure, en partenariat avec le Forum Vauban. Sans cette importante participation citoyenne, le quartier Vauban n'aurait certainement pas vu le jour tel qu'il est actuellement.

Parlons aussi d'une première expérience pilote d'un panel de citoyens dans le Brabant wallon. Soixante deux habitants, tirés au sort, ont travaillé ensemble avec l'aide de spécialistes pour remettre aux autorités politiques leur avis dans le cadre de la future révision des plans de secteur de leur province. Ce sont des hommes et des femmes de 16 à 80 ans, ayant des professions très diverses : employés, ouvriers, sans-emploi, cadres, au foyer, pensionnés, étudiants... 36 heures de rencontres, d'informations et de débats avec une cinquantaine de personnes ressource, d'acteurs sociaux, économiques et environnementaux, et de représentants politiques. Entre février et mai 2001, ils ont échangé et confronté leurs points de vue. Ils ont participé à l'élaboration d'une réflexion commune et ont rédigé un avis commun... (André-Dumont 2002). La réussite de cette expérience concrète a permis de fonder la qualité de cette démarche d'un panel de citoyens. Il s'agit de :

- construire des espaces de dialogue entre les citoyens et le monde politique ;
- remettre un avis qui complète, sans les remplacer, les formes classiques de concertation et de participation ;
- aider la population à mieux s'approprier la décision prise par le politique.

Le travail de participation citoyenne élaboré par l'Atelier de Travail Urbain (ATU) de Grande-Synthe s'est caractérisée à la fois par l'expérimentation de nouvelles formes institutionnelles d'aide à la décision et par la recherche de procédures culturelles permettant aux citoyens de mieux connaître la ville et ses modes de production. Dès sa naissance en 1994, l'ATU affiche deux objectifs :

- formuler un projet urbain qui permette à ce qui n'est encore qu'une « banlieue éclatée en quartiers », d'évoluer vers une forme et un statut de « ville » à travers la restructuration de ses espaces publics.
- faire du projet urbain l'occasion d'approfondir le débat démocratique et la réflexion sur la ville et de rendre permanente la participation des habitants dans la définition du cadre de vie.

D'après les participants, l'ATU devient rapidement un « lieu d'intégration », « un lieu de formation civique », « une école non seulement de la ville mais aussi de la vie ». Il s'est avéré que ce type de participation est une solution d'aide réelle face aux problèmes d'intégration que connaissent les habitants d'origine étrangère ; la réflexion et le débat sur la ville et l'espace public jouent un rôle important dans l'établissement d'un dialogue avec eux. (ATU 1995)

Mais n'oublions pas que l'intégration du processus de participation est un choix qui se développe dans le temps et avec l'expérience : « *la participation est comme la démocratie: elle ne se donne pas, elle se conquiert par un travail quotidien* ». (Schoonbrodt & Marechal 2000)

1.2.3 L'adaptation

Joël de Rosnay nous rappelle que, pour qu'un système complexe puisse durer, il ne suffit pas qu'il soit optimisé par rapport aux circonstances de sa formation, mais il doit aussi « *s'adapter aux modifications de l'environnement et évoluer. Sinon, des agressions extérieures ne tardent pas à le désorganiser et à le détruire.* » (de Rosnay 1975)

S'inscrire dans un milieu s'est aussi être capable d'évoluer en même temps que ce milieu. Cette adaptation est donc un ajustement aux modifications éventuelles du contexte physique, construit ou humain d'un lieu. Par l'adaptation physique, il s'agit notamment de tenir compte des évolutions du site ou du climat. Par l'adaptation du contexte construit, on peut intégrer le vieillissement et le remplacement de certains bâtiments. Par l'adaptation au contexte humain, il s'agit de s'adapter à l'évolution des attentes des habitants. Les tendances sensibles au sein de la société actuelle sont notamment l'augmentation des loisirs, le vieillissement de la population et l'évolution de la taille des ménages qui va en se rétrécissant. Ces éléments sont donc plutôt favorables à un retour de la population en ville.

Ce principe d'adaptation s'applique à toutes les échelles spatiales et temporelles de notre contexte. Par exemple, l'architecte doit tenir compte des variations climatiques saisonnières et locales pour assurer en permanence le confort des habitants. Il doit aussi envisager les modifications profondes du contexte physique telles que le réchauffement climatique global. Ainsi, notons que les circonstances actuelles de pollution urbaine sont très différentes de celles du passé.

L'urbanisme, comme programme d'ensemble, est de conception récente mais depuis toujours la ville se transforme, se régénère, se construit sur elle-même pour s'adapter aux besoins de ses habitants et à la mutation des modes de production.



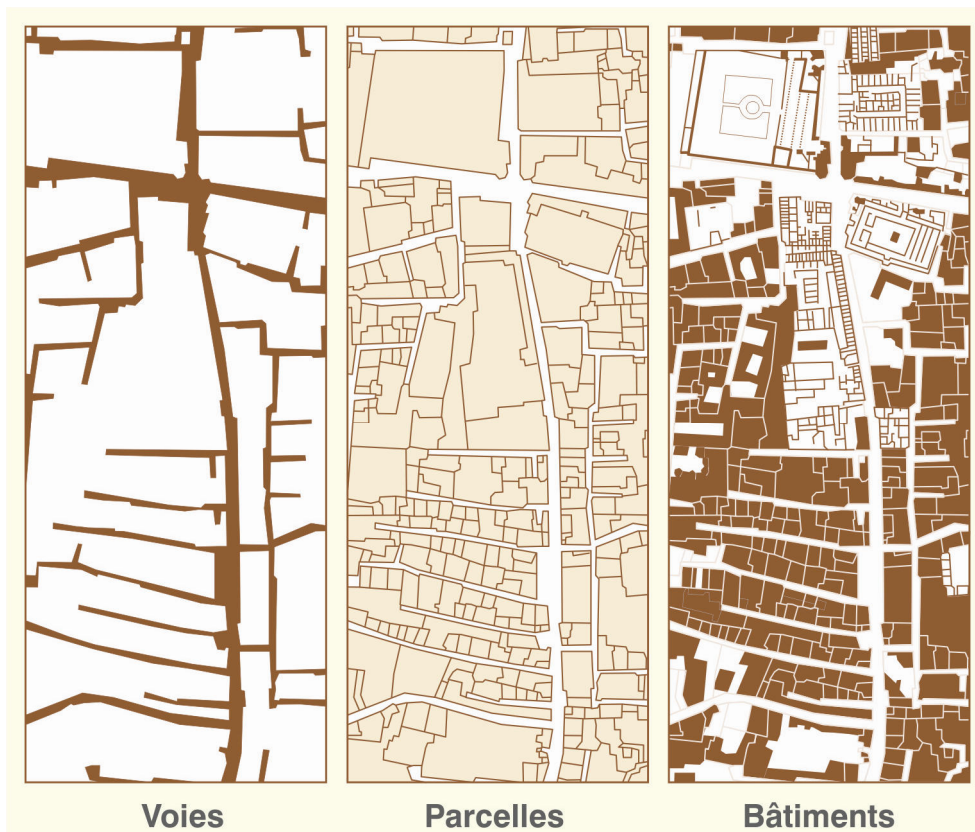
Transformations urbaines. (Photo : S. Reiter).

La pratique du « renouvellement urbain » est une constante de l'histoire des villes : toutes les villes ont connu des changements, des bouleversements, des métamorphoses... L'obsolescence qui peut temporairement toucher certains

territoires urbains est un phénomène naturel. Une société qui est incapable de se reproduire est une société qui meurt.

Les villes sont condamnées à la recherche d'un équilibre toujours à recommencer. Mais il faut le faire en s'inscrivant dans une continuité avec des structures urbaines aussi durables que possible. « *La qualité du tissu ancien qui devrait être la qualité de tout tissu urbain (pourvu qu'on l'y autorise) tient à sa capacité d'assurer simultanément la stabilité et le changement. D'un côté la permanence des tracés, l'existence de monuments, la convention qui régit l'espace public, la persistance des activités et des symboles ; de l'autre, la malléabilité des constructions, le changement des usages, la reconversion des bâtiments, la substitution de certains d'entre eux.* » (Panerai & al. 1999). Rome est par excellence l'exemple d'une ville qui a toujours su se renouveler. N'est-ce pas pour cela qu'on la surnomme la « ville éternelle » ?

La ville traditionnelle se caractérise par un tissu urbain adaptable, issu d'une recherche de contiguïté et d'articulations. Les centres villes européens ont généralement conservé un lien étroit entre le bâti, le système de voiries et le parcellaire. C'est l'imbrication de ces trois composantes de base de la morphologie urbaine qui permet à la ville d'évoluer tout en maintenant la cohésion de l'ensemble et la clarté de la structure (Panerai & al. 1999). Le schéma ci-dessous présente ces trois composantes essentielles du tissu urbain : les voies, les parcelles et les bâtiments. Leur désolidarisation complexifie leurs capacités d'évolution, de diversification et d'appropriation.

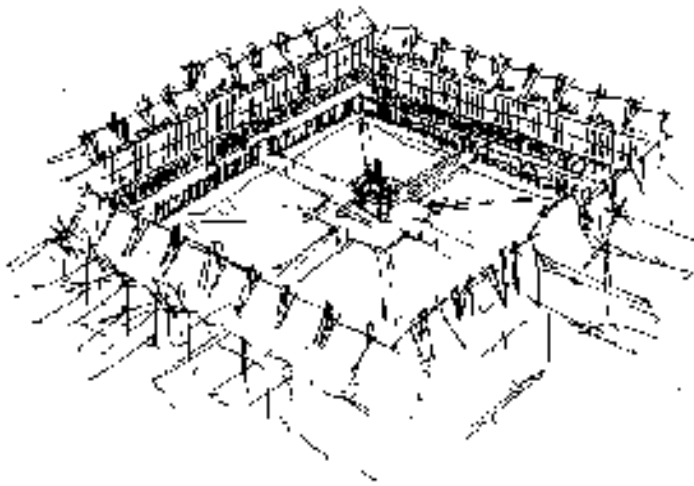


D'autre part, soulignons la qualité de multifonctionnalité intrinsèque à ce tissu urbain traditionnel. C'est une qualité essentielle pour les possibilités d'adaptation d'une ville. Tout quartier devrait offrir une variété de fonctions économiques,

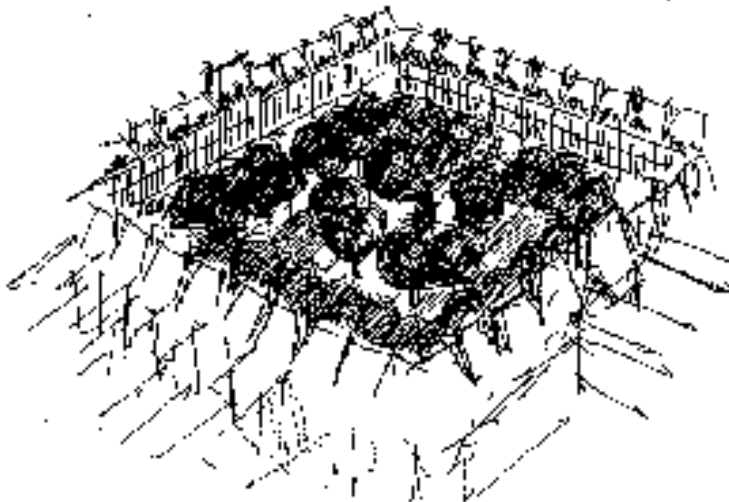
sociales, culturelles et naturelles pour assurer le plus haut degré d'adaptation à long terme.

Les différents courants urbains modernes et post-modernes ont malheureusement participé à la perte du tissu urbain traditionnel et à la formation d'une architecture « objet » sans référence à l'espace public. Citons quelques éléments emblématiques des disfonctionnements des étendues urbanisées contemporaines : le zonage fonctionnel, la séparation des réseaux de mobilité, le rejet de l'alignement et du front de rue, le pastiche du passé,.... Ces processus de développement urbain paralysent les capacités naturelles d'adaptation des villes.

En général, les rôles donnés aux espaces urbains évoluent plus rapidement que la forme construite. La place des Vosges à Paris est un bon exemple de cette capacité d'un lieu public à accueillir des adaptations et des modifications de son usage, tout en continuant d'assurer son rôle dans la structure des espaces publics de la ville. Les deux schémas ci-dessous (Bertrand & Listowski 1984) représentent l'évolution de son aménagement au cours des siècles.



Place des Vosges à l'origine : la place royale (statue équestre et parterres).
(Dessin : Bertrand & Listowski 1984)



Place des Vosges aujourd'hui : un square du quartier.
(Dessin : Bertrand & Listowski 1984)

Ce concept d'adaptation signifie également qu'il faut conserver dans la durée grâce à la rénovation des bâtiments, au recyclage de ses composants ou à la transformation de son usage.

Une règle de bonne pratique est de **rénover**, de **réaffecter** ou de **recycler** tout élément construit quand c'est possible. Le viaduc de la Bastille à Paris offre un exemple des avantages sociaux, économiques et environnementaux qui peuvent être générés grâce à la réutilisation de constructions urbaines existantes. Les photos ci-dessous présentent cette superbe rénovation urbaine. La partie supérieure est maintenant aménagée en un parc linéaire surélevé, à travers lequel court une promenade bordée d'arbres. Ce projet, dirigé par l'architecte Patrick Berger, comprend 13 hectares de parc au-dessus du viaduc et la conception de magasins dans les arches du pont au niveau du sol.



Rénovation urbaine du viaduc de la Bastille, à Paris. (Photos : S. Reiter).

A Copenhague, le quartier Vesterbro a été l'objet d'une rénovation urbaine profonde. Proche de la gare centrale, sud-ouest de la ville, il s'étend sur 35 hectares. L'habitat, majoritaire, côtoie des immeubles bureaux et des hôtels.

Construit entre 1850 et 1920, ce quartier autrefois appelé "Inner Vesterbro" alignait des immeubles de 5 ou 6 étages maximum datant, pour 90% d'entre eux, d'avant 1900. 64% des appartements ne possédaient pas de chauffage central ni d'alimentation en eau chaude sanitaire, 71% n'étaient pas équipés de salles de bain, 11% n'avaient pas de WC. Environ 6 100 habitants vivaient alors dans ce quartier très dense : étudiants principalement, mais aussi immigrés, retraités, chômeurs... souvent en grande précarité. Propriété de particuliers ou de la ville, la plupart des appartements étaient en location. Ce quartier devenait progressivement un ghetto favorisant le trafic de drogue, la criminalité et le chômage (20% des habitants, soit

un taux de chômage deux fois supérieur à la moyenne nationale). En 1990, un programme de réhabilitation de ce quartier a été lancé. Le plan ci-dessous montre l'ampleur de la zone rénovée. (IMBE 2005).



Quartier Vesterbro. (IMBE 2005)

Les architectes danois chargés de sa rénovation ont su créer à Vesterbro des blocs d'immeubles harmonieux mêlant des constructions d'architecture très contemporaine avec des bâtiments existants rénovés. Les anciennes cours intérieures des îlots ont été remplacées par des espaces verts équipés d'abris pour les vélos, de containers à déchets, d'étendoirs à linge, ...



Le quartier Vesterbro à Copenhague (IMBE 2005)

Grâce aux cheminements piétonniers, les habitants profitent des efforts engagés en matière de verdissement du quartier. La mixité fonctionnelle de ce dernier leur permet, la plupart du temps, de se rendre à pied au supermarché, chez le médecin, à l'école et au travail.



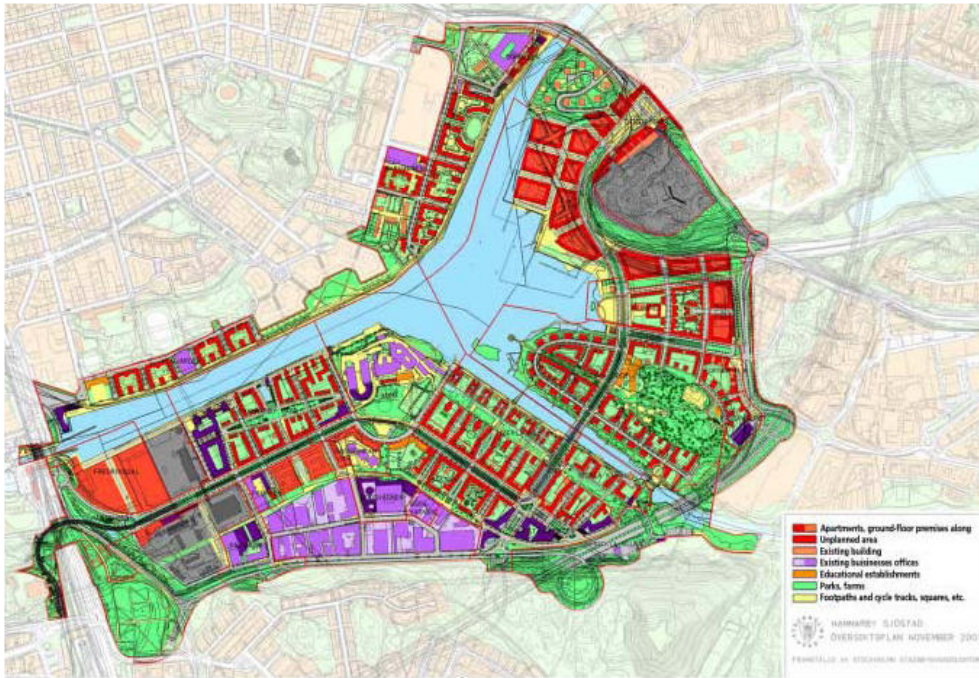
Le quartier Vesterbro à Copenhague (IMBE 2005)

Les solutions techniques retenues ne s'appliquent pas à tous les immeubles rénovés de Vesterbro. Chaque îlot a ses solutions techniques spécifiques, utilisées seules ou de façon intégrée. Citons, à titre d'exemple, celles retenues dans le bloc d'immeubles de Hedebygade, qui a contribué à la mise en oeuvre de solutions écologiques de rénovation des vieux bâtiments: isolation, intégration des technologies de chauffage solaire, cellules photovoltaïques sur les façades exposées au sud et ventilation couplée au système d'énergie solaire avec un pré-chauffage de l'air, réseau de distribution de l'eau à basse température, éclairage naturel, mesures des consommations énergétiques par le biais de compteurs, tri des déchets, purification de l'air à l'aide de plantes vertes, toitures et façades végétalisées, création d'une maison communautaire...

Il faut toutefois souligner que la réhabilitation du parc de logements a entraîné insensiblement un changement de la composition de la population, en attirant des personnes à niveau social plus élevé. En effet, la rénovation urbaine de Vesterbro a produit une augmentation des loyers qui a fait fuir les ménages les plus modestes - obligeant le gouvernement local à leur trouver un nouveau logement- et parallèlement a attiré une couche sociale plus aisée. Il est regrettable que la couche sociale la plus défavorisée n'ait pas pu profiter des bénéfices de cette action de renouvellement urbain et c'est une constatation qu'il faudrait tenter de prendre en compte dans des projets futurs de ce type. Signalons cependant que le quartier présente aujourd'hui une plus grande mixité sociale qu'auparavant.

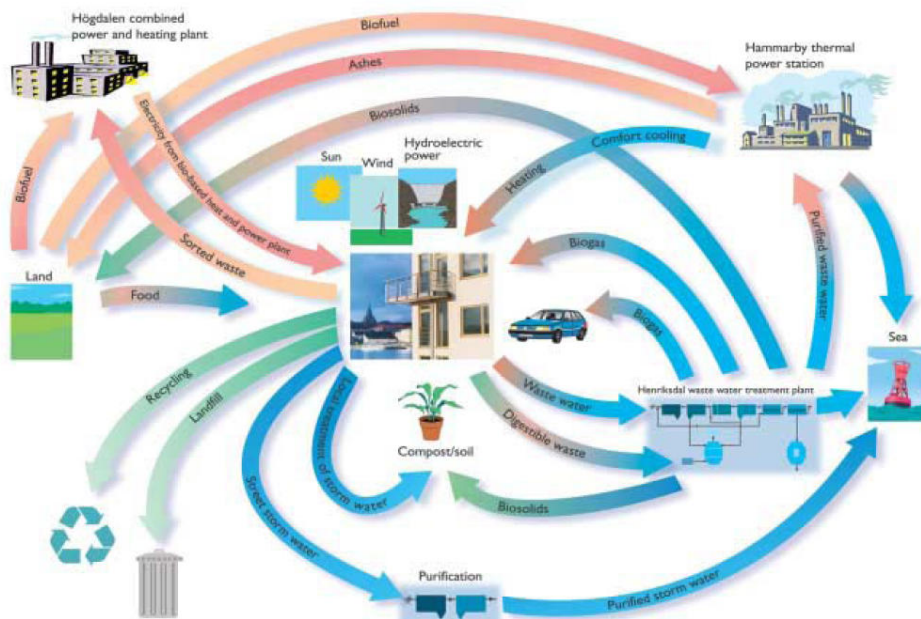
L'approche écosystémique urbaine met en évidence le quartier comme un système complexe caractérisé par des processus d'échanges, mais aussi de changements continus. Les éléments tels l'énergie, les ressources naturelles, les déchets, les substances nutritives ou les matériaux sont considérés comme des flux qu'il s'agit d'entretenir, de restaurer, de stimuler et de valoriser au mieux, dans une perspective d'économie en boucle et de recyclage. Chaque quartier peut également être considéré comme un écosystème social qui assimile différentes catégories d'individus, de modes de vie, d'activités ou de cultures. Selon cette notion d'écologie humaine, le quartier doit avant tout être conçu afin d'offrir des services et des infrastructures de base accessibles à tous et doit pouvoir, par ailleurs, s'adapter à des aspirations et à des contraintes sociales en perpétuelle mutation. Le quartier Hammarby Sjöstad en Suède illustre parfaitement cette vision à la fois environnementale et sociale de l'approche écosystémique urbaine.

Hammarby Sjöstad était un quartier sinistré qui est devenu un modèle de quartier durable, après un renouvellement urbain de grande ampleur. Ancien site portuaire et industriel partiellement en friche, d'une superficie d'environ 200 hectares, il se trouve au sud, à proximité immédiate du centre ville de Stockholm et de la réserve naturelle de Nacka. Jusqu'à son renouveau dans les années 90, son paysage était constitué de baraquements, d'entrepôts, de bureaux et de petites industries. Aujourd'hui, ce quartier regroupe des habitations, commerces et bureaux. Au démarrage du projet, les prévisions étaient de 8 000 appartements pour 15 000 habitants et 8 000 emplois créés. L'aménagement doit se terminer en 2010 et ambitionne d'accueillir une population de 30 000 personnes vivant et travaillant dans le quartier. Le schéma ci-dessous donne le plan d'implantation d' Hammarby Sjöstad.



Le quartier Hammarby Sjöstad en Suède (IMBE 2005)

Le modèle “Éco-cycle” utilisé dans la phase de conception de ce projet de renouvellement urbain est un programme environnemental conçu dans l'intention de rendre autonome le quartier tout au long de son cycle de vie. Six objectifs environnementaux le fondent : les transports en commun (tramway, ferry boat, ...), les matériaux de construction sains, l'utilisation des sols déjà construits, le plafonnement du bruit à 45 dB, la décontamination des sols et enfin l'optimisation des services d'énergie, d'eau et de déchets. Les rejets et déchets du quartier ont pu être divisés par deux grâce au recyclage, à la séparation des eaux usées et pluviales ainsi qu'à l'utilisation de nouvelles technologies. (IMBE 2005)



Modèle « éco-cycle » du quartier Hammarby (IMBE 2005)

Les photos ci-dessous montrent la qualité des bâtiments et des espaces publics de cette rénovation urbaine.



Le quartier Hammarby Sjöstad en Suède (IMBE 2005)

Aujourd'hui, Hammarby est en mesure d'offrir un bon nombre des services d'un centre ville. Tout est mis en oeuvre pour le bien-être des habitants, des plus jeunes aux plus âgés, en passant par les plus fragiles. Au coeur des îlots, la vie a repris ses droits depuis que les gens s'approprient les espaces communs.



Le quartier Hammarby Sjöstad en Suède (IMBE 2005)

1.3 Coexistence

La pauvreté et les inégalités sociales actuelles sur Terre sont inacceptables. Nous ne pouvons plus continuer de vivre dans la prospérité en niant les besoins fondamentaux de la majorité des êtres humains. Il est temps de coexister sur notre planète et de partager nos ressources pour vivre ensemble dans la paix et le bien-être. Nous pensons qu'il faut concevoir aujourd'hui une éthique pour habiter-ensemble sur Terre, dans le respect de la différence de chacun.

Rappelons le premier principe de la Déclaration des Droits de l'Homme : « *Tous les êtres humains naissent libres et égaux en dignité et en droits. Ils sont doués de raison et de conscience et doivent agir les uns envers les autres dans un esprit de fraternité* ». Toutefois, les niveaux de consommation des ressources par les pays industrialisés ne peuvent satisfaire l'ensemble de la population mondiale actuelle et encore moins les générations futures, sans détruire définitivement le capital naturel. Œuvrer dans le sens du développement durable nécessite de travailler à limiter la pauvreté, assurer la santé publique et la qualité de l'environnement naturel et construit pour protéger durablement la vie humaine ainsi que l'équilibre des écosystèmes et l'épanouissement de la faune et de la flore dont l'humanité reste dépendante. Ainsi, du point de vue du développement durable, le concept de coexistence réaffirme le premier principe de la déclaration des droits de l'homme mais il l'élargit et le prolonge dans ses dimensions spatiales (prise en compte du bien-être de l'ensemble des nations mais aussi des écosystèmes et de toutes les formes de vie sur Terre) et temporelles (les générations passées, présentes et futures).

Afin de parvenir à un développement durable et à une meilleure qualité de vie pour tous les peuples, chaque état devrait réduire et éliminer les modes de production et de consommation non viables et promouvoir des politiques démographiques appropriées. Cependant, conformément à la déclaration de Rio sur l'environnement et le développement ainsi qu'à la Charte des Nations Unies et aux principes du droit international, chaque pays a le droit d'exploiter ses ressources selon sa politique propre pour autant qu'il évite de causer des dommages à d'autres zones terrestres.

Les philosophes grecs de l'Antiquité, notamment Platon et Aristote, de même que les philosophes médiévaux dans leur ensemble, ont soutenu l'idée que l'homme est par nature un animal civique. L'homme n'est et ne devient vraiment lui-même que dans la Cité, c'est-à-dire dans la société civile et politique. Il est donc fait par et pour la vie sociale.

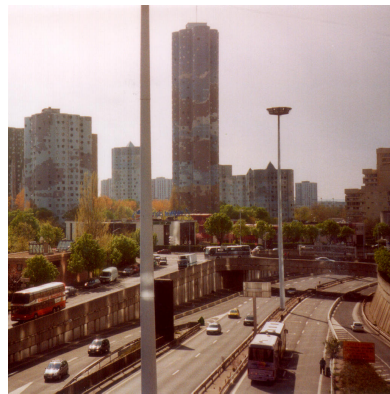
La ville est à la fois un produit social et un bien commun. L'urbain pose fondamentalement la question de l'être ensemble. En tant qu'établissement commun construit par l'homme, la ville est coexistence. Habiter en ville, c'est exprimer un mode de « vivre-ensemble », c'est-à-dire co-habiter. L'espace public est par essence le lieu privilégié de cette cohabitation. Ainsi, la coexistence, qui qualifie un espace de sa **nature collective**, est un des éléments fondateurs de tout lieu public. La question de l'espace public nous interroge sur nos capacités à vivre ensemble dans un monde de plus en plus individualisé. Il s'agit bien de retrouver, dans le partage de l'espace public, une éthique de vie en société : la cohabitation implique la **mise en présence dense et complexe des différences**.



Les photos ci-dessous montrent un exemple et un contre-exemple de la signification du concept de coexistence urbaine. Ainsi, la place de l'Épée offre un lieu de **rassemblement**, situé dans un tissu dense, présentant une grande **diversité** et une **ouverture** à l'altérité. Il s'agit d'un large espace appropriable pour les piétons, mais qui n'exclut pas totalement les voitures qui peuvent longer la place sur trois de ses bords. Cette place urbaine est bien un lieu créateur de coexistence. Par opposition à cet exemple réussi, la photo de droite montre un exemple européen de l'envahissement de l'espace public par les voitures et d'une morphologie urbaine qui nie toute relation ; le piéton est totalement exclu de ce type d'urbanisme, qui nous empêche de vivre ensemble.



Place de l'Épée à Bruxelles. (Reiter 2003)



La défense, Paris. (Reiter 2003)

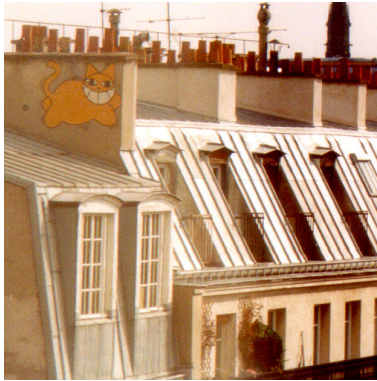
Les paragraphes qui suivent interrogent l'espace public sous cet angle du vivre-ensemble pour arriver à mieux cerner cette notion de coexistence, à travers les concepts de rassemblement, de diversité et d'ouverture.

1.3.1 Le rassemblement

Cette coexistence essentielle de la ville est avant tout un rassemblement. Martin Heidegger nous rappelle que « *le lieu rassemble. Le rassemblement conduit le rassemble à son être et l'y abrite* » ou, dit autrement, « *le lieu est ce qui rassemble en soi l'être d'une chose.* » (Heidegger 1958). Il existe une quantité d'exemples qui illustrent le rôle de centre de rassemblement des espaces publics urbains. Nous pouvons mentionner l'agora grecque et le forum romain, les marchés du Moyen-Age et les places des cathédrales qui unifiaient l'intérieur symbolique de l'édifice à la ville profane.

Malheureusement, peu de places publiques sont encore de véritables lieux : pour qu'un espace public devienne lieu, il doit rassembler. Ce rassemblement se décline selon différentes gammes allant de la coexistence historique des strates ou couches de la ville à la diversité économique en passant par la mixité de la population et des fonctions ou la coexistence symbolique.

Il y a dans l'être-là, dit Heidegger, une tendance essentielle à la proximité; pour créer des connexions entre êtres et choses, il faut d'abord les rapprocher. Et d'après Hannah Arendt, « *il faut que les hommes vivent assez près les uns des autres pour que les possibilités de l'action soient toujours présentes.* » (Arendt 1983). Plutôt que de favoriser la rapidité de la mobilité entre zones éloignées, l'espace urbain se devrait d'offrir des possibilités de trouver des réponses à la majorité des besoins dans la proximité. Le rassemblement demande une proximité, c'est-à-dire un regroupement selon une certaine densité.



Les toits de Paris
(Photos : Reiter 2003).



La place des Sciences à Louvain-la-Neuve

Seules la concentration des lieux habités et la densité humaine qui caractérisent la ville rendent possible l'anonymat en tant que condition de possibilité pour les libertés réelles. « *Stadtluft macht frei* » : l'air de la ville émancipe (rend libre). Ce dicton célèbre renvoie aux libertés que procurait la ville médiévale par opposition au servage rural mais à l'heure actuelle on peut le réinterpréter au travers du concept philosophique de liberté comme possibilité d'autodétermination humaine. La ville rend toujours libre aujourd'hui : dans beaucoup de pays du monde, la ville facilite une certaine libération de la femme, en lui permettant de contester plus facilement l'autorité de l'homme et de gagner sa vie par elle-même.

Il existe des liens historiques entre la construction de la ville européenne et la construction et la légitimation progressive des principes des droits de l'homme. Ainsi, la genèse urbaine des droits de l'homme est visible dans les luttes historiques aussi anciennes que la lutte des communautés urbaines d'Italie, des Flandres et d'Allemagne (Ansay & Schoonbrodt 1989).

L'automobile, l'informatique et les nouvelles techniques de communication sont souvent présentées comme des atouts pour s'installer hors de la ville et des substituts à la proximité physique et à la communication humaine directe. Les formes spatiales sont révélatrices des valeurs collectives d'une civilisation : cette nouvelle société de l'information définit des espaces abstraits qui nous coupent de notre territoire physique et de notre corps. C'est pourquoi, la facilité de l'information à distance augmente paradoxalement nos besoins de contacts humains personnels (CEE 1990). La place publique en ville reste donc le lieu privilégié de ce face à face sans médiation, indispensable aux vrais contacts humains.

« La ville devrait être le lieu où il est possible de s'unir aux autres sans tomber dans la compulsion de l'intimité. Je ne crois pas qu'il s'agisse d'une vision utopique : après tout, la ville a toujours constitué, jusqu'au siècle dernier, un foyer de vie sociale active, un lieu où pouvaient se révéler et se vivre toutes les possibilités humaines ». (Sennett 1979)

L'urbanité de la ville se mesure à sa capacité de rassembler en aménageant des espaces publics suffisamment nombreux et attractifs pour permettre aux citoyens de se rencontrer, d'échanger, de se réunir, selon l'occasion, l'heure de la journée ou le choix existentiel de chacun. Les nœuds autoroutiers et les grands espaces vides de nos urbanisations dispersées ne sont pas des espaces de frictions qui rendent possible le contact. La ville apparaît comme le seul lieu possible à l'apprentissage de la civilité, premier pas vers une volonté de vivre ensemble démocratique, c.à. d. une manière de concilier l'existence de différences et l'invention d'un commun.



Vivre ensemble. (Photo : S. Reiter).

Pour motiver les passants à s'attarder sur une place publique, il faut leur offrir des possibilités variées d'activités et de repos. On doit par exemple pouvoir s'asseoir à l'ombre et au soleil, en groupe ou à l'écart, en prenant une consommation ou sans avoir d'argent,... Ainsi, une bonne répartition des bancs, murets et autres opportunités pour s'asseoir dans tout l'espace disponible favorise l'utilisation de ceux-ci par les différents types d'individus qui traversent la place (Gillon 2002).

Inviter les citoyens à séjourner sur une place signifie que les possibilités de s'y arrêter et de s'y asseoir doivent être évidentes. La séparation claire entre piétons et voitures est un élément important de l'aménagement de tout espace public. Divers dispositifs peuvent faciliter cette séparation : bordures, bandes de matériaux nobles, usages de revêtements spécifiques pour chaque type d'usager, disposition en lignes d'éléments créant une limite visuelle telles qu'une rangée d'arbres ou du mobilier urbain (lampadaires, bancs, poubelles,...). La photo ci-dessous représente la place Joachim du Bellay à Paris (Gillon 2002).



La place Joachim du Bellay à Paris (Gillon 2002).

Nos places urbaines sont trop souvent envahies par des parkings omniprésents. Ainsi, de nombreux espaces ouverts dans nos villes ont perdu leur caractère de lieu public parce qu'ils sont encombrés par le stationnement automobile. Ces espaces publics ont perdu leur rôle de rassemblement et ne laissent plus la place aux rencontres aléatoires indispensables pour toute ville durable.



Place du Grand Sablon à Bruxelles - Place Rouppe à Bruxelles. (Photos : S.Reiter).

Ce processus peut toutefois être enravé. La place d'armes à Namur est un bel exemple du réaménagement d'une place qui servait de parking en une espace public collectif et vivant (marchés réguliers,...). Un parking a été créé au sous-sol.



La place d'armes à Namur (Photo : S.Reiter).

Les espaces publics de Louvain-la-Neuve sont des lieux conçus pour induire de nombreuses rencontres : ces rues piétonnes et conviviales génèrent un face à face qui incite à la discussion.



Rue piétonne à Louvain-la-neuve (Photo : S.Reiter).

Au niveau urbain, rassembler signifie aussi réunir des significations multiples, articuler le dehors et le dedans, l'ombre et la lumière, le public et le privé, le quotidien et l'exceptionnel, le sacré et le profane... C'est ainsi qu'on pourrait définir l'espace public urbain comme un complexe de formes, de temps, de forces et de significations qui suppose un rassemblement dans la différence.

Le rassemblement que devrait créer l'espace public n'est pas seulement spatial mais aussi temporel. L'espace public est créateur de mémoire. Écoutons Charles Péguy nous parler de la ville: « *Ramassant tout cela, concentrant, fixant tout cela comme un point sur la carte, ramassant, concentrant, fixant le temporel et l'éternel dedans, cerclant tout cela dans leur couronne murale, encerclant, reconcentrant tout cela dans leur front de pierre, matérialisant tout cela dans la pierre de leur corps, dans leur corps de pierre, sous leur front de marbre, faisant du temps même un lieu, faisant de l'histoire une géographie, une topographie, un plan, quelle réussite* ».

Les principes directeurs de l'UNESCO confirment que le patrimoine culturel de l'humanité est indispensable à son équilibre et à son développement dans la mesure où il lui offre un cadre adapté à son mode de vie et lui permet de rester en contact avec le témoignage des civilisations antérieures. Le patrimoine culturel est une ressource très fragile qu'il convient de préserver pour les générations futures.



Patrimoine culturel de l'humanité à Rome (Photo : S.Reiter).

N'oublions toutefois pas que, si les espaces publics de la ville sont des lieux de mémoire, ils devraient toujours être aussi des lieux de projets car nous n'héritons pas seulement notre environnement de nos parents, nous le léguons aussi à nos enfants.



Le Centre Georges Pompidou à Paris
(Architectes: R. Piano et R. Rogers; photo : S.Reiter).

Juxtaposer anciens et nouveaux bâtiments est une pratique qui a un long passé dans nos villes. Beaucoup de nos villes européennes affichent des contrastes frappants entre différents styles architecturaux du passé. Il existe des compositions sublimes, telles que celle du King's College à Cambridge où la célèbre chapelle gothique, autrefois isolée au milieu d'une prairie, se détache aujourd'hui devant des bâtiments classiques.

On peut donc voir l'espace public comme la coexistence spatiale de plusieurs temps. C'est un des rôles de l'espace public que d'offrir ces possibilités de coexistence harmonieuse entre des édifices de différentes époques.



La Maison Carrée et le Carré d'Art à Nîmes. (Photo : S. Reiter).

Les trois photos ci-dessous donnent un exemple de la différence fondamentale entre l'urbanisation contemporaine dispersée et les paysages belges traditionnels. L'étalement croissant de nos urbanisations cause la perte de notre patrimoine paysager, contrairement aux villages traditionnels qui assuraient un certain regroupement du bâti et présentaient des caractéristiques régionales.



Urbanisation contemporaine dispersée. (Photo : Ministère de la Région Wallonne 1985).



Paysage naturel wallon



Village wallon traditionnel

(Photo de gauche : S. Reiter ; photo de droite: Ministère de la Région Wallonne 1985)

Les liens entre ville et campagne sont d'une importance déterminante pour la viabilité des établissements humains. En outre, dans de nombreuses régions du monde, les agglomérations rurales constituent un enjeu majeur parce qu'elles permettent d'atténuer les pressions qui s'exercent sur le développement urbain. Ainsi, une densité urbaine moyenne associée à des agglomérations rurales de petites dimensions mais de grande qualité permet d'assurer un rassemblement suffisamment dense pour éviter les nuisances environnementales, sociales et économiques générées par l'étalement urbain actuel.

Les incidences sur l'environnement de la construction d'un nouveau lotissement en zone rurale sont généralement négatives à plusieurs niveaux : perte des sols aptes à la culture, risques de pollution domestique affectant une nappe souterraine, diminution de la visibilité du paysage rural, augmentation de l'utilisation de la voiture ... Il est donc essentiel de s'interroger sur les critères de réappropriation des centres urbains et sur les possibilités de densification des noyaux d'habitat existants. A l'heure actuelle, il est inacceptable de continuer de construire des petits lotissements avec maisons quatre façades, loin de toute infrastructure de transport en commun.

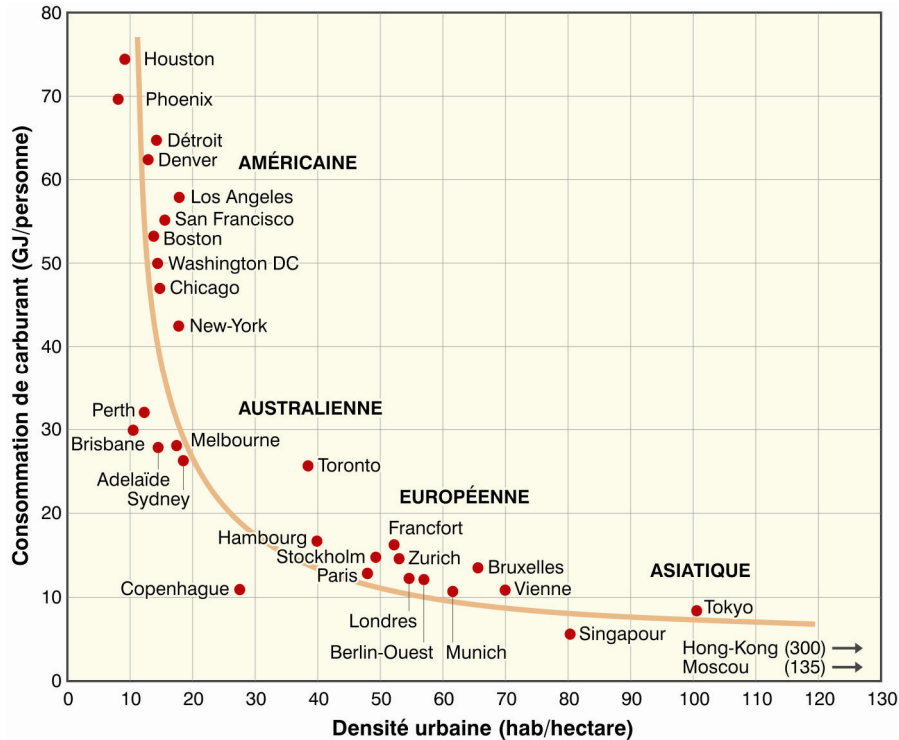
Une certaine densité d'habitat est également nécessaire aux niveaux économique et social. La dispersion des logements s'accompagne d'infrastructures pour permettre l'alimentation en eau, gaz, électricité des nouveaux sites urbanisés, de la création de superstructures telles que les équipements culturels ainsi que d'une augmentation de l'offre des services en matière de distribution postale ou de collecte de déchets. Les coûts ainsi engendrés sont, proportionnellement, nettement supérieurs à ceux qui sont liés à une urbanisation de forte densité. Et au niveau social, le manque de densité crée forcément un manque de possibilités de rencontres et l'absence d'espace public de partage.

Signalons également que la dispersion de l'habitat crée davantage de différenciation démographique et sociale entre zones urbanisées, ce qui induit le développement d'inégalités sociales entre les noyaux denses et les zones périurbaines. Il en résulte un appauvrissement des villes par la baisse de recettes fiscales provenant des habitants du centre, l'augmentation des dépenses sociales, la dégradation des logements et les dépenses nécessaires à la rénovation urbaine... (Martin 2003).

La densité du bâti est au coeur de la définition de la ville dans son acception traditionnelle. Cette recherche d'une densité forte correspond à différents avantages écologiques:

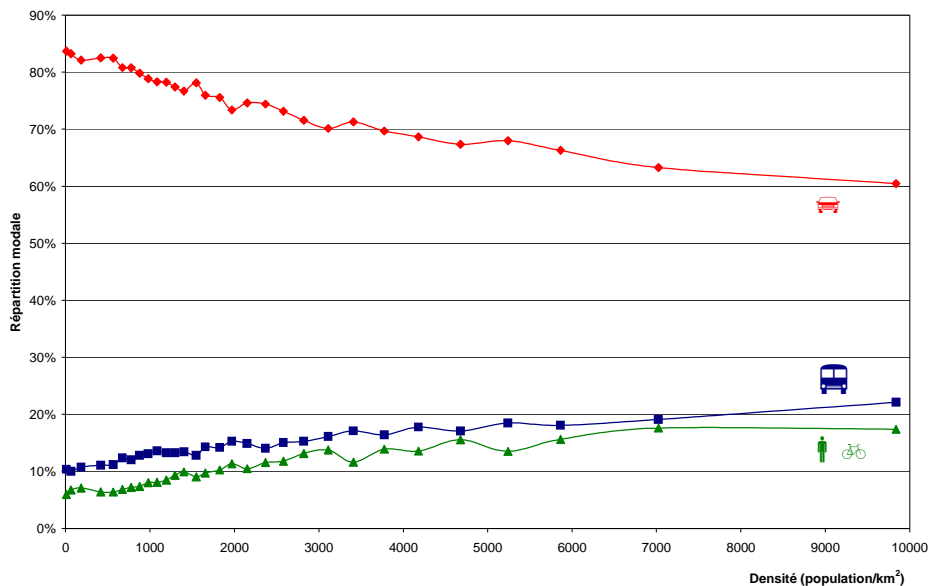
- une plus faible emprise de la ville sur le paysage et donc la préservation de ressources naturelles et de territoires non urbanisés.
- la diminution des déperditions énergétiques des bâtiments grâce à la mitoyenneté, à la compacité des constructions et à l'effet d'îlot de chaleur urbain.
- la limitation des trajets nécessaires et donc des dépenses énergétiques associées. Des études ont montré qu'il existe une corrélation significative entre le couple densité démographique élevée/taille de la ville et la diminution de la longueur moyenne des déplacements ainsi qu'entre une faible densité urbaine et un usage intensif de la voiture (CEE 1996)

Le graphe ci-dessous donne la répartition des consommations de carburant par personne en 1980 en fonction de la densité urbaine en nombre d'habitants par hectare (Newman & Kenworthy 1989). On constate une très forte augmentation moyenne de l'utilisation de la voiture lorsque la densité tombe en-dessous de 30 personnes par hectare.



Répartition des consommations de carburant par personne en fonction du nombre d'habitants par hectare (Newman & Kenworthy 1989)

Cette constatation est confirmée en Belgique par une étude de la région wallonne en 1991. Le graphe ci-dessous montre la répartition modale des déplacements domicile-travail en fonction de la densité (nombre d'habitants/km²).



Répartition modale du transport en Région wallonne en fonction de la densité (CPDT 1991).

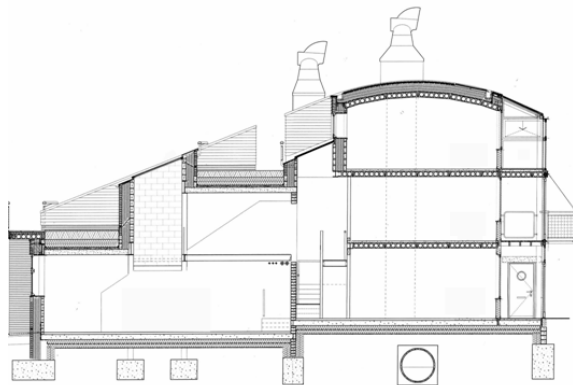
Les études de la CPDT (2002) ont montré quels étaient les paramètres qui affectent le coût d'une désurbanisation latente. Parmi ceux-ci, la consommation d'espace par l'urbanisation peu structurée, la dédensification urbaine et la monofonctionnalité de certaines zones sont clairement pointées comme causes de coûts collectifs importants et d'impacts environnementaux négatifs. 8

Au niveau européen, le projet Propolis (CEE 2004-c), a testé, modèles à l'appui, différentes politiques d'aménagement du territoire et de transport dans sept villes européennes. La conclusion de cette recherche est que les politiques individuelles axées sur la restriction de la voiture, l'utilisation des transports publics ou l'aménagement d'une zone urbaine ne sont pas suffisantes à elles seules pour rencontrer les objectifs d'un développement durable. Pour être vraiment efficaces et assurer la viabilité des villes européennes à long terme, il est indispensable de coordonner ces différentes politiques et de les combiner avec des mesures d'aménagement du territoire et d'urbanisme visant à augmenter la densité urbaine et l'utilisation mixte des sols.

Quand on parle de densifier notre habitat, il s'agit d'aller contre la tendance européenne actuelle à l'étalement des constructions à travers tout notre paysage. Pour combattre le phénomène de désurbanisation et le départ en périphérie non seulement des habitants mais aussi de nombreuses fonctions urbaines, entraînant une paupérisation du cadre bâti et des populations résidentes au cœur des villes, il faut envisager :

- de stabiliser la présence de la fonction résidentielle dans les parties les plus centrales et les plus denses de la ville,
- de densifier l'habitat dans les périphéries les plus proches (parcelles inoccupées, intérieurs d'îlots surdimensionnés,...), les espaces urbains abandonnés (friches urbaines, sites d'activité économique désaffectés, ...) et autour des connections de lignes de transport en commun.
- de concevoir des espaces publics de qualité tant à l'échelle de la ville qu'à celle du quartier.

Le modèle architectural et urbanistique de BedZED (Beddington Zero Energy fossil Development) est un exemple d'une densité fonctionnelle élevée, obtenue grâce à l'intégration architecturale des espaces d'habitation (façades sud des immeubles) et des espaces de travail (façades nord). Chaque logement dispose d'une serre, exposée au sud afin de capter la chaleur et la lumière du soleil. Des espaces réservés aux cyclistes et aux piétons ont été aménagés devant les logements ainsi qu'entre deux corps de bâtiments : les enfants peuvent y jouer en toute sécurité. La mixité fonctionnelle du quartier permet aux résidents travaillant sur place de réduire les déplacements, puisque les bureaux et les différents services (café, garderie, pharmacie, centre médical) sont à proximité des habitations.



De gauche à droite : bureau, habitation, serre. (Coupe : Simos Yannas)



BedZED (Photo : Simos Yannas)



BedZED (IMBE 2005)

Cet exemple est une solution parmi d'autres pour générer une mixité des usages dans un quartier. D'autres solutions de mixité existent à différentes échelles et selon des modalités variées : citons par exemple la mixité fonctionnelle au sein d'un quartier traversé par une rue commerçante, la mixité au sein d'un îlot urbain entre bâtiments voisins, la mixité verticale au sein d'un bâtiment entre un atelier d'artisanat au rez-de-chaussée et des logements aux étages, etc. La coexistence de la ville consiste aussi à rassembler des solutions variées.

Au niveau de la densité construite, il faut signaler que la mégapole, ce milieu technique hors-échelle humaine, rend plus difficile l'appartenance à un milieu commun et l'appropriation de l'espace public par les habitants. Il y a donc un équilibre à trouver entre la sous-densité et la sur-densité. Les centres villes historiques européens sont encore un exemple que cet équilibre est possible.



Marseille (Photo : S.Reiter).

En outre, une densité trop importante des bâtiments exerce une pression sur l'environnement au niveau local. Citons comme exemple d'inconvénient d'une trop forte densité la concentration de pollution atmosphérique et sonore. La photo ci-dessous montre la ville de Mexico, connue pour ses problèmes de pollution atmosphérique.



Mexico (Photo : S.Reiter).

Une forte densité apporte donc des bénéfices environnementaux au niveau planétaire mais crée des contraintes importantes au niveau local et pour la santé des habitants. Plus la densité devient forte, plus les risques d'inconfort pour la population deviennent importants. De même, plus grande est la concentration d'activités humaines, plus vite les seuils de la capacité de charge écologique régionale seront atteints.

On pourrait synthétiser cette problématique en disant que l'habitant d'un centre ville pollue moins que celui d'une urbanisation étalée mais que le premier subit une pollution plus grande que le second. La problématique de la forme urbaine consiste donc à gérer de la manière la plus efficace la densité forte souhaitée afin de la rendre attractive et de réduire ses nuisances au niveau local et humain. Nous suggérons donc de densifier notre habitat dispersé, tout en portant une attention spéciale aux performances énergétiques des bâtiments, à la qualité des places et des parcs ainsi qu'au choix d'une mobilité plus respectueuse de l'environnement. Il faut signaler qu'une conception bioclimatique de la ville (accès au soleil,...) n'implique en aucun cas la suppression de zones urbaines denses. Par contre, il est important de réintroduire des modes d'habitat liés à la nature.



Bruxelles (Photo : S.Reiter).

Un exemple contemporain de valorisation d'une densité urbaine durable accompagnée d'une recherche de mixité des fonctions se trouve dans le quartier Kronsberg à Hanovre en Allemagne. C'est un quartier de 6300 habitants répartis sur 70 ha construits, conçu dans un but de recherche équilibrée entre la densité des volumes construits et des espaces verts. Le coefficient d'occupation des sols (c'est-à-dire le rapport entre la surface totale habitable et la surface au sol de la zone urbaine) de ce quartier est de 1.2.



Quartier Kronsberg à Hanovre. (Photos : IMBE 2005).

La question d'une densité urbaine durable s'appuie sur les notions de ville "courtes distances" ou ville "compacte". En effet, un quartier durable inclut des densités élevées, des mixités d'usages et de fonctions, en lien avec l'accessibilité et la reconnaissance de l'espace public comme élément structurant de la ville et lieu d'agrément. Une conception urbaine durable du point de vue de la densité s'appuie sur la recherche d'un équilibre entre logements, emplois, équipements de services, activités de loisirs et des infrastructures de transport valorisant la mobilité intermodale et les moyens de transport écologiques (marche, vélo, transports publics).

La configuration urbaine optimale ne fait toutefois pas l'unanimité. Le Livre vert sur l'environnement urbain (CEE 1990) explique que la ville compacte est vraisemblablement la forme optimale du point de vue énergétique, sans parler de ses avantages économiques et sociaux. Cette densification suppose cependant que l'on parvienne à inverser la tendance à la contre-urbanisation qui se manifeste aujourd'hui dans tous les pays occidentaux; certains s'inquiètent aussi de la perte d'espaces ouverts qu'entraînerait la « compacité » du tissu urbain.

Parmi les autres structures urbaines que proposent les ouvrages académiques figurent les agglomérats sociaux, la concentration décentralisée et les bandes linéaires (CEE 1996). Ces différentes possibilités ont cependant en commun l'idée d'augmenter la densité urbaine autour des endroits très accessibles, spécialement aux transports publics. Quant à savoir si cette conception implique le maintien d'un centre unique ou l'évolution vers un agencement polynucléaire, il est nécessaire de prendre en compte l'échelle à laquelle la densification s'applique et les particularités du schéma d'implantation local. Il est clair que chaque environnement urbain requiert une solution particulière qui dépend des conditions locales.

Des stratégies de densification de nos urbanisations sont devenues indispensables : il faut réinvestir les lieux désaffectés en ville (les anciennes zones industrielles, les entre-deux,...) et densifier la périphérie proche de la ville. Il est possible de développer des tissus périurbains articulés aux réseaux de chemins de fer. Il faut pour cela qu'ils soient suffisamment denses pour offrir des potentiels d'usagers suffisants. Le périurbain devient alors une situation différente qui n'impose plus la dépendance à la voiture.

Il est important de souligner qu'en Belgique les contraintes imposées aux promoteurs pour un aménagement du territoire durable sont encore trop timides.... Des incitations politiques et financières doivent être adoptées, par exemple pour limiter l'aménagement de terrains vierges. Voici quelques actions à mener d'urgence dans le but de réaliser un aménagement urbain durable:

- afficher et définir une politique forte de développement durable dans les documents d'urbanisme ou à travers des procédures volontaires de type Agenda 21.
- privilégier la reconversion des friches urbaines à la création de quartiers neufs sur des espaces agricoles ou naturels ;
- planifier les infrastructures de transport, d'équipements et de services dès le démarrage du projet.
- mettre en œuvre des mesures fiscales dans le but de récupérer les très nombreuses parcelles inutilisées au cœur même de nos villes.

Il est important de rappeler que les mesures d'amélioration de la « durabilité » de la forme urbaine ne présentent pas la même efficacité selon l'endroit où elles s'appliquent. En effet, certaines mesures efficaces sur le plan énergétique peuvent s'avérer contre-productives sur le plan de la mobilité ou de l'accessibilité sociale.

Encourager la construction de nouveaux logements à haute efficacité énergétique en dehors des centres, par exemple, risque de favoriser la désurbanisation et donc, de générer un accroissement des déplacements en voiture vers les lieux d'emploi réduisant les effets durables attendus. C'est en fonction d'un bilan global intégrant les dimensions économiques, sociales, culturelles et environnementales que l'on doit opter pour tel ou tel ensemble de mesures. Il faut donc distinguer quelles sont les mesures de densification ou de mixité à appliquer sur l'ensemble d'un territoire, celles qui gagneraient à être ciblées sur des zones urbaines ou des agglomérations, celles visant les quartiers centraux ou péri-centraux des villes et des villages, celles enfin qui pourraient toucher plutôt des types d'habitats spécifiques. On identifiera également des mesures qui ne méritent pas, à priori, de spatialisation mais pour lesquelles des priorités spatiales peuvent être dégagées afin de renforcer d'autres mesures. Par exemple, l'isolation des bâtiments et l'amélioration des réseaux de distribution (eau, énergie,...) sont des mesures efficaces en tout lieu mais qui mériteraient d'être appliquées prioritairement dans les zones plus denses pour renforcer les politiques liées à la densité urbaine.

1.2.2 La diversité

La diversité est une fonction essentielle pour nos lieux d'habitation. A l'heure actuelle, l'urbanisation homogénéise les territoires et les paysages par types tels que les systèmes autoroutiers, le lotissement suburbain, le complexe commercial ou le zoning industriel. Or, même pour l'économie, la diversité d'une ville participe à l'attractivité de celle-ci.



Système autoroutier
(Photo : K. De Myttenaere)



Lotissement suburbain
(Photo : J.M. Halleux 2005)

L'espace public ne peut pas être le lieu d'une fonction spécifique ni le lieu où se juxtaposent différentes fonctions spécifiques; il doit être le lieu, ou plutôt le *milieu*, qui met diverses potentialités en interrelation à travers le rapport à l'espace. La démesure d'un seul usage de l'espace public est une menace pour les autres. L'équilibre entre fonctions différentes est la loi de conservation de leur coexistence. A l'échelle de la ville, cela implique notamment la recherche d'un équilibre entre le logement, l'emploi et les équipements collectifs. Ainsi, « *Le drame de Bruxelles ne réside pas dans la concentration de nombreuses fonctions centrales mais dans le fait d'en avoir exclu toute vie quotidienne. Maintenir la cohabitation de ces deux sphères de la vie urbaine, protéger la fonction la plus faible: telles auraient dû être les tâches des aménageurs de tous les niveaux. Cet échec de l'urbanisation de Bruxelles est aussi celui de certaines villes de Wallonie, grandes et moyennes: on le mesure à l'exode des habitants de la ville.*» (Schoonbrodt & Marechal 2000)

La photo ci-dessous montre le Ponte Vecchio à Florence qui rassemble de manière magnifique différentes fonctions urbaines : le passage d'un cours d'eau, un ensemble de commerces et un lieu public de qualité.



Le Ponte Vecchio à Florence (Photo : S. Reiter).

Une ville devrait offrir des espaces publics où chaque possibilité d'action existe à chaque instant. Les villes européennes offrent encore une diversité relative. Entretenir cette diversité c'est assurer que notre vie sociale et culturelle ne soit pas uniformisée par la production industrielle. « *La menace pour la ville du 21^{ème} siècle est celle d'une équivalence généralisée, basée sur un nouveau « pseudo-universel » et sa transformation en marchandise réglée par le seul impératif de profit, quitte à hypothéquer durablement le sort des générations ultérieures.* » (Ansary & Schoonbrodt 1989).



Diversité d'usages (Photos : S. Reiter).

La nature des activités riveraines a une incidence sur la fréquentation et le contrôle social d'un espace public et donc sur la sécurité et l'accueil des personnes. Il est judicieux d'être attentif à la présence dans chaque quartier de diverses activités ouvertes au public et créatrices d'animation, y compris en soirée. La photo ci-dessous montre la place du marché aux légumes à Namur où commerces, cafés et restaurants assurent l'accueil et le contrôle social de la place (Gillon 2002).



Place du marché aux légumes à Namur (Gillon 2002).

En plus de la multifonctionnalité, la polyvalence de l'espace public est aussi une qualité de coexistence qui permet qu'en certaines occasions, ou périodiquement, un espace public soit par exemple voué totalement à un seul usage. Les « rues-citoyennes » à Ixelles, St Gilles,... sont fermées de temps en temps pour faire la fête ensemble, ce qui permet de se rendre compte que la rue nous appartient à tous. Les marchés qui envahissent régulièrement les places de nos villages et de nos villes sont un autre exemple de la qualité de cette coexistence temporelle entre différents usages. Un même lieu peut donc présenter une pluralité des visages aussi bien spatialement que temporellement. Par exemple, veiller à la mise en lumière nocturne d'un espace public le rend sécurisant et accueillant, ce qui permet de diversifier son usage.



La polyvalence des usages (Photos : S.Reiter).

L'espace public est fondateur de démocratie et d'équité sociale par sa capacité à rassembler dans la diversité. Citons à ce sujet Pierre Ansay et René Schoonbrodt dans leur livre 'Penser la ville': « *La coexistence permet donc à la ville d'être le lieu non de la rencontre des semblables par la famille ou la culture mais par excellence le lieu de la rencontre de la différence dans la liberté et l'égalité, grâce à quoi il est possible, au moins pour partie, de dépasser les contraintes et les limitations de la fortune, de l'appartenance culturelle et même ethnique. (...) C'est pourquoi la ville doit être conçue et vécue comme facteur de croissance de la liberté, de l'égalité et de la fraternité. Cette coexistence, fondement de la ville, est souvent perçue comme dangereuse car la liberté trace la voie à la recherche de l'égalité.* » (Ansay & Schoonbrodt 1989).

Pour construire une urbanité, il est indispensable de développer la coexistence des groupes sociaux, des cultures, des langages, des religions, des âges et des activités. La photo ci-dessous est un exemple typique de nos urbanisations dispersées : il s'agit d'un lotissement du brabant wallon qui visiblement regroupe uniquement des familles de même âge et de même classe sociale. Ce type d'urbanisme crée un isolement social générateur d'incompréhension et d'intolérance.



Uniformité sociale (Photo : S.Reiter).

Cynthia Ghorra-Gobin nous donne un bon exemple : « *L'Etat fédéral aux Etats-Unis, dès la fin des années 70, a rencontré de sérieuses difficultés pour légitimer sa politique sociale à l'égard des quartiers en difficulté. Ces difficultés s'expliquent en grande partie du fait que la grande majorité des électeurs qui s'étaient suburbanisés n'avaient plus de contact physique ou encore ne côtoyaient plus « ces gens » dans la rue et les seules images qu'ils avaient des autres étaient celles de la presse mettant l'accent sur la violence. Tout électeur américain a douté du bon usage des impôts à l'égard des quartiers sensibles.* » (Ghorra-Gobin 2000). A partir de cet exemple, on voit à quel point il est nécessaire de prendre en compte l'espace public urbain et la nécessité des contacts physiques entre individus pour assurer notre démocratie. En privilégiant la politique de l'Etat comme le seul moyen pour assurer l'harmonie sociale, nous avons oublié que les espaces publics aussi contribueraient à l'harmonie sociale en tant que matérialité d'un imaginaire commun. La diversité et la variabilité de l'espace public semblent être une condition d'apparition de certains rôles sociaux.

Il faut signaler que la désurbanisation induit une absence de cohésion sociale. Celle-ci est renforcée par le manque d'intégration de différentes couches de la population. Le niveau d'intégration peut s'évaluer à partir des disparités territoriales de revenus des ménages et de la dépendance économique (proportion de chômeurs, de pensionnés, de gens en âge de travailler, etc.). Il faut éviter que des inégalités importantes perdurent et se renforcent entre quartiers, accentuant un sentiment d'exclusion parmi les ménages défavorisés. C'est ainsi que les taux d'évolution des revenus et des valeurs de vitalité économique sont autant d'indicateurs de ségrégation des zones périurbaines par rapport aux grandes villes qui s'appauvrissent.

Vivre ensemble dans les mêmes espaces publics nous apprend la tolérance, le respect de l'autre, la variété des points de vue et des croyances... Les lieux publics devraient préserver l'anonymat de l'individu tout en lui fournissant un registre de références pour se penser avec les autres.



Trafalgar square : anonymat et présence de l'autre (Photo : S.Reiter).

Un exemple contemporain de mixité des fonctions et des habitants est le quartier BedZED (Beddington Zero Energy fossil Development), un quartier qui a été construit au Royaume-Uni sur des principes de développement durable. Il rassemble une variété de fonctions: 82 logements, 2 500 m² de bureaux et commerces mais aussi un espace communautaire, une salle de spectacles, des espaces verts publics et privés, un centre médicosocial, un complexe sportif, une

crèche, un café et un restaurant. Loin d'être réservé à une élite piquée d'écologie, BedZED affiche un patchwork social. Ainsi, plus de la moitié des logements a été réservée à des familles à revenus modestes. La planification du quartier a été lancée en 1999 et les premiers résidents occupent les lieux depuis 2002. (IMBE 2005)

L'espace public se doit aussi d'être un lieu de confrontation et de négociation entre les acteurs sociaux des différentes sphères de la société civile et l'Etat. Les espaces publics jouent ce rôle d'espaces de médiation symbolique entre classes sociales : on manifeste dans la rue pour faire entendre sa voix et négocier dans la sphère politique.



Manifestations (Photo de gauche : S.Reiter ; photo de droite : CEE).

Tout au long de l'histoire, les villes ont été le lieu de la production et de la distribution des inégalités sociales. Cette mise en évidence de la diversité des conditions sociales a largement contribué à faire prendre conscience de la nécessité de politiques sociales en vue de réduire ces inégalités.

Chamboredon et Lemaire affirment toutefois que la proximité spatiale aiguise la distance sociale, particulièrement pour les groupes situés aux extrémités de la hiérarchie. Ainsi, il apparaît que les formes de sociabilité qui se développent dans les grands ensembles expriment les frictions engendrées par la coexistence contrainte de groupes sociaux différents (Remy & Voye, 1981). La ville se doit donc d'offrir la possibilité de quartiers ou d'îlots urbains différenciés mais l'espace public accessible à tous permet de laisser libre cours à des rencontres aléatoires en toute liberté. Entretenir la diversité ne signifie pas juxtaposer des éléments totalement hétérogènes mais plutôt offrir la possibilité de contacts libres entre éléments différents. Des espaces de transition peuvent servir d'articulation grâce à laquelle des extrêmes à première vue incompatibles peuvent se côtoyer. Une mixité sociale relative est toutefois à favoriser dans tous les quartiers.

Du point de vue de la mixité sociale, le projet "Habitat International" du nouveau quartier Kronsberg à Hanovre comprend 20% de logements sociaux dont 17% réservés à des familles immigrées. Ce projet est particulièrement intéressant en ce sens que les aménagements intérieurs de ces appartements ont été conçus en tenant compte des différences culturelles des futurs résidents. Par exemple, les cuisines sont plus vastes et les appartements destinés aux musulmans disposent d'une pièce centrale orientée vers La Mecque. On trouve également dans ce quartier une grande mixité de fonctions. (IMBE 2005)

Au niveau des ambiances urbaines, l'objectivité est toujours intersubjectivité. On ne peut négliger la diversité nécessaire dans les espaces publics afin de permettre cette approche collective. Bien souvent, le désir moyen de diversité des citoyens

amène à un tissu suburbain sans limite fait de maisons quatre façades et de petits jardins. Les concepteurs doivent travailler sur les possibilités multiples des contrastes au niveau du paysage urbain (par les types de sols, l'hydrologie, les matériaux,...). Un lieu public ouvre des opportunités variées ; il propose sans jamais contraindre.



Bruxelles : Mont des Arts (Photos : S.Reiter en 2003).

La diversité recherchée peut être favorisée par une diversité de la forme urbaine : mixité du type de logements proposés (par exemple entre petits collectifs et maisons individuelles accolées), formes architecturales variées (traitement coloré des façades, variété des matériaux utilisés...), ... Ces éléments ont une implication directe sur la mixité des fonctions, l'équilibre emploi-habitat et la mixité sociale et générationnelle des habitants.

Le quartier Vauban, en périphérie de Fribourg, en est un bon exemple. Douze anciennes casernes, situées au centre du nouveau quartier, ont été rénovées et affectées à 220 logements alternatifs et 600 logements d'étudiants, assurant une diversité de la population. Le reste du quartier a été consacré à la construction de 2000 logements ainsi que des bâtiments destinés à accueillir des activités industrielles et artisanales offrant 600 emplois ainsi que des équipements scolaires et des commerces. Le quartier Vauban, qui devrait à terme compter 5 000 habitants, attire beaucoup de jeunes parents, cadres et universitaires pour la plupart, désireux d'accéder à la propriété à des prix raisonnables.



Quartier Vauban : casernes rénovées et nouveaux bâtiments de logement (IMBE 2005)

Très varié dans ses formes comme dans les couleurs des bâtiments, le quartier Vauban est très apprécié par ses habitants. Les anciens immeubles des casernes côtoient divers types de réalisations contemporaines : maisons en bande, maisons jumelées, immeubles collectifs de quatre étages maximum ...



Quartier Vauban : diversité des formes et des couleurs (Photos : IMBE 2005)

Cette mixité du bâti est due à une variété des typologies et des activités ayant lieu dans le quartier. Le plan des rues alterne les parcelles larges et étroites, dans l'idée de créer une variété de bâtis. De plus, les conceptions des maisons d'une même rue ne sont pas confiées au même promoteur afin d'assurer une variété des façades mitoyennes.



Quartier Vauban : diversité typologique (IMBE 2005)

L'espace public comme lieu multifonctionnel nécessite sa réorganisation et son partage. Tous les utilisateurs (piétons, cyclistes, automobilistes, handicapés, personnes utilisant les transports en commun, ...) doivent pouvoir s'y épanouir aussi librement que possible. Partager l'espace public, c'est montrer par des aménagements que les différents utilisateurs de l'espace cohabitent équitablement en donnant une place juste à chacun d'eux.



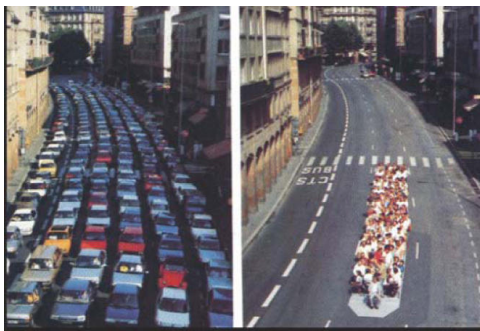
Partage de l'espace public entre différents types d'utilisateurs (Photos : S. Reiter).

Lorsque la voiture envahit les trottoirs, sature les voies de circulation et transforme les espaces de rencontre en parkings, aucun autre moyen de transport ne peut être viable. Il faut insister sur le fait que ce n'est pas la voiture qui est problématique mais l'excès d'automobiles, parce qu'il s'accompagne d'une limitation des autres alternatives de déplacement. Il est donc nécessaire de mieux contrôler l'espace pour en permettre de multiples usages.



Envahissement des espaces publics par la voiture.
(Photo de gauche : S. Rouche ; photo de droite : S.Reiter).

Chaque mode de transport utilise de l'espace dans la ville quand il circule mais aussi quand il est à l'arrêt. La perte d'espace due au trafic automobile individuel est importante. En 2001, à Strasbourg, 240 personnes se sont mobilisées pendant une heure dans l'espace-rue fermé à la circulation pour une mise en scène comparant la consommation d'espace liée à l'usage de la voiture par rapport à celle du tramway. Les photos ci-dessous ont rendu cet événement inoubliable. On voit qu'un tramway vaut 177 voitures (en prenant en compte un taux d'occupation moyen de 1,38 personnes par voiture, c'est-à-dire 240 personnes) ou 3 autobus. De plus, la voiture individuelle est encore plus consommatrice d'espace puisqu'elle reste généralement parquée la majorité du temps alors que le bus ou le tram transportent des personnes pendant toute la journée.



Comparaison de la consommation d'espace entre l'usage de voitures et d'un tramway.
(Escudero 2004).

Notons que les avenues créées par Haussmann laissaient environ la moitié de l'espace public pour les piétons et l'autre moitié pour la circulation. Les rétrécissements de trottoirs opérés dans les années soixante nous ont fait perdre le caractère grandiose de ces avenues.



Avenue des Champs-Élysées: début du 20^{ème} siècle. (Kostof 1992).

De même, à Bruxelles, l'avenue Louise en 1900 constituait la « promenade » des bruxellois, un lieu de balades, de flâneries, où l'on pouvait circuler à pied, en tram, en automobile (à l'époque des premières autos). C'était un lieu social de rencontres dans la symbolique des gens. Aujourd'hui, l'avenue Louise est un espace de flux, principalement destiné au trafic automobile. Il existe encore un espace réservé au passage du tram et un petit trottoir pour les piétons mais le déséquilibre entre les différents usagers de l'espace urbain est évident.



Avenue Louise en 1900 (Escudero 2004). Avenue Louise en 2003 (Escudero 2004).

La photo ci-dessous, prise dans le centre de Paris, présente un autre problème évident de la voiture : elle génère un sentiment d'insécurité pour les piétons. Sur cette photo, le panneau central indique « Piétons, **attention**, traversez en deux temps », ce qui souligne bien le processus d'exclusion du piéton, induit par la vitesse des voitures.



Exclusion des piétons due à la circulation automobile (Photo : S.Reiter).

La transformation des boulevards urbains arborés en autoroutes urbaines a réduit la fonction de la rue (rencontre, promenade,...) à un simple moyen de déplacement sans prendre en considération ses finalités propres en tant qu'espace public. Le cours des 50 Otages à Nantes est un exemple de la possibilité de redéfinir les autoroutes urbaines de nombreuses villes européennes rééquilibrant l'espace offert aux différents utilisateurs de ces espaces de manière à ce que l'échelle humaine soit revalorisée. Les deux photos ci-dessous montrent

- le cours des 50 Otages en avril 1970 : une autoroute urbaine
- le cours des 50 Otages en septembre 1993, après l'introduction du tramway et la requalification de cet espace-flux en espace-lieu.(Escudero 2004)



Cours des 50 Otages en avril 1970 à gauche et en septembre 1993 à droite (Escudero 2004)

On remarque aussi que si du point de vue fonctionnel, la séparation spatiale du cours des 50 Otages présente un espace pour les piétons et les cyclistes, un espace pour les tramways et un espace pour les voitures et les bus. Par contre, du point de vue de l'usage et de la perception des piétons, la séparation spatiale est divisée en deux zones : un très grand espace pour les piétons, les cyclistes et les tramways et un espace à quatre bandes, bien délimité, pour les voitures et les bus.

Ainsi, le projet du cours des Cinquante-Otages a transformé un espace de coupure et de transition automobile en une longue et large promenade urbaine pour les piétons, sans pour autant y exclure la voiture. Cet espace est aussi un axe vert qui crée une continuité avec toute une série d'espaces verts de la ville de Nantes. L'enjeu du partage de l'espace public et de sa multi-fonctionnalité est une réussite.



Cours des Cinquante-Otages à Nantes. (Reiter 2003)

La place, le quartier, la ville ont besoin des piétons qui jouent un rôle irremplaçable dans l'animation urbaine. La présence des piétons dans une rue attire toujours d'autres piétons. Une rue fréquentée est toujours plus attrayante et plus sécurisante. Parce que, de tous les modes de déplacements, la marche est le plus civique, celui qui coûte le moins cher à la collectivité, que ce soit en consommation d'énergie, en consommation d'espace ou en dépenses imputables aux accidents et à la pollution, investir en faveur des piétons, c'est opter, à long terme, pour une politique de renouveau urbain.

Cependant, à l'heure actuelle, la volonté de rendre la ville aux piétons s'est trop souvent traduite par la création de voies piétonnes commerciales dans les centres historiques, à savoir la création de ghettos piétonniers voués à l'unifonctionnalité. Rendre réellement la ville aux piétons c'est plutôt leur offrir, tout au long de leurs parcours, des cheminements continus et agréables. Signalons par exemple les arcades comme un moyen de conception architectural qui augmente l'espace de la circulation piétonne en l'empruntant au bâti, tout en permettant une certaine densité construite. D'autre part, des passerelles pour piétons et cyclistes peuvent faciliter la traversée d'axes routiers à fort trafic. Mais ces mesures doivent être accompagnées d'une forte diminution de la circulation par une politique cohérente au niveau des entrées de ville et au niveau des transports publics.

Signalons encore que si des mesures drastiques de diminution des voitures étaient réellement appliquées dans nos villes nous pourrions redessiner nos espaces publics totalement différemment. Nos petits trottoirs et nos pistes cyclables en bord de route pourraient retrouver des dimensions convenables.

Dans le quartier Vauban, à Fribourg, les places de parking ou garages privés ne sont possibles que pour 25% des logements, situés à la marge du quartier. Pour les autres logements, deux grands garages collectifs de type « parkings-silos » sont construits aux entrées du quartier (de 50 à 300 m des habitations). Ainsi, la circulation au sein du quartier est fortement limitée (mais pas interdite) et les rues sont des espaces de vie et de jeu pour les enfants.



Quartier Vauban : bâtiment collectif de parking. (IMBE 2005)

En 1997, la ville de Gand en Belgique a implémenté un plan de mobilité dans le centre-ville dans le but de réduire les problèmes de trafic excessif dans les rues et sur les places du centre-ville. 80% des voies empruntées par les trams et les bus dans le centre de Gand sont séparées des voies pour automobilistes, ce qui a rendu les transports publics plus efficaces et a augmenté leur utilisation de 3 à 5% depuis la mise en place de ce plan de mobilité. D'autre part, il y a plus de cyclistes dans la ville qu'auparavant et les accidents de la route ont diminué de 30%. (CEE 2004b)

Les photos ci-dessous montrent deux vues des espaces publics piétons de Gand. Le quai aux herbes, situé au centre de Gand, est un des lieux historiquement important de cette ville au passé marchand. Libéré de la voiture, il a été aménagé en une promenade urbaine qui met en valeur les nombreux monuments remarquables qu'il borde.



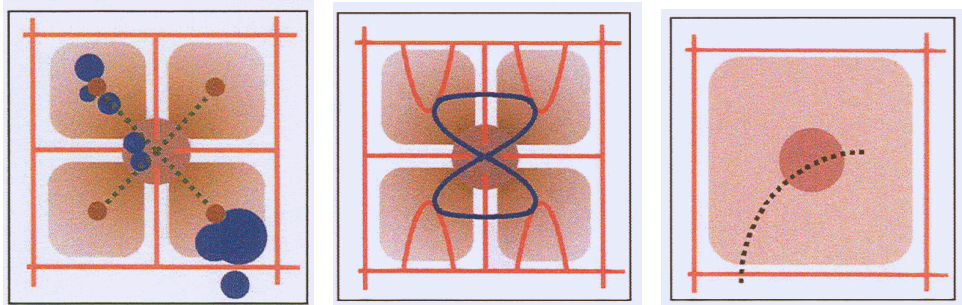
Espace public piéton (CEE 2004b)



Le quai aux herbes (Photo J.M. Gillon)

En Belgique, la ville de Louvain-la-Neuve, sortie de terre dans les années 70 consacre les valeurs de la ville compacte au service du piéton. Le centre piétonnier de Louvain-la-Neuve comporte toutes les fonctions dont se compose un centre urbain vivant : habitat, commerces, services privés et publics, université, lieux

culturels et de culte, restaurants, terrasses de cafés ... Le schéma ci-dessous synthétise le fonctionnement de la circulation dans la ville de Louvain-la-Neuve. On voit le réseau piéton (lignes vertes) qui relie chaque quartier au centre et le réseau automobile (en orange) en périphérie de chaque quartier. Il faut y ajouter le passage d'un TEC en boucle (en bleu sur le second schéma) et la gare qui amène les trains en plein centre-ville (courbe pointillée sur le troisième schéma). Le premier graphe montre également comment les différentes implantations universitaires (taches bleues) ont été réparties dans la ville de façon à créer un maximum d'animation.



Schémas synthétiques de la circulation à Louvain-la-Neuve (Mertens 2002)

La ville de Fribourg en Allemagne a mis en service en 1972 un plan de circulation accordant une large place aux pistes cyclables. Plus de la moitié des déplacements en ville se font à vélo (190 km de pistes cyclables en zone urbaine), en tramway ou sur le réseau ferroviaire régional. Les voitures particulières sont interdites au centre-ville où le réseau de tramway n'a jamais été abandonné et s'est étendu.

Aujourd'hui, face à la pollution, certaines villes dynamiques en Europe ont opté pour le retour du tram dans les centres avec, en corollaire, parkings de dissuasion en périphérie, liaisons avec les bus, accès vélos et piétonniers, c'est-à-dire une vraie politique alternative des déplacements. Ainsi, Strasbourg a vu augmenter de plus de 45 % la fréquentation des transports en commun et diminuer de 20 % le trafic automobile. Le plan et l'explication de ce projet ont été détaillés aux pages 63 et 64 de cette thèse. Certains sont encore plus audacieux et ont combiné les accès pour le tram et pour le train afin d'augmenter encore l'efficacité et la rapidité des transports en commun.

L'exemple de Curitiba laisse rêveur. Cette ville brésilienne compte 1 500 000 habitants, mais ses transports publics accueillent chaque jour 1 800 000 passagers. Suite au renouvellement de son infrastructure des transports en commun, une réduction de 30 % des déplacements automobiles a été observée, ce qui est la preuve de son efficacité. Il s'agit essentiellement de lignes de bus à haute fréquence (5 à 10 minutes en heure pleine et moins de 15 minutes en heure creuse) fonctionnant pour la plupart en site propre.

Soulignons l'importance de créer des réseaux de liaisons qui privilégient les modes de déplacements écologiques (piétons, cyclistes, transports en commun) entre les cœurs des villes et leurs banlieues les plus proches ainsi qu'entre les différents quartiers périphériques d'une même urbanisation.

Des promenades peuvent servir de liens entre lotissements, villages, ou zones urbaines et zones rurales. Ainsi, ces allées vertes peuvent à la fois servir de parcours pour une mobilité écologique et de corridors naturels pour la biodiversité ainsi que de lieux où certains éco-systèmes spécifiques peuvent être implantés.

Les anciennes voies de chemin de fer ou autres infrastructures linéaires qui ne sont plus utilisées peuvent être avantageusement transformées en promenades pour piétons, cyclistes, rollers, cavaliers,... aussi bien en ville qu'en dehors de la ville. Un exemple remarquable est la revalorisation d'une section de la ligne 160(B) qui reliait Bruxelles à Tervuren. Cette zone désaffectée a été réaménagée en promenade verte pour piétons et cyclistes. Elle offre le grand avantage de relier de nombreux services urbains tels qu'un campus universitaire (VUB), des bureaux de la Commission Européenne, un shopping center important, des écoles, restaurants, centres de sport avec une zone urbaine d'habitations denses et plusieurs nœuds d'échange de système de transport (transports en commun et axes pour automobiles). Cette promenade verte passe à côté du parc de Woluwé Saint-Pierre et de nombreux espaces de jardins privés. Les photos ci-dessous montrent une passerelle pour piétons et cyclistes qui assure la continuité de cette promenade de sept kilomètres créée sur le tracé de l'ancien chemin de fer Bruxelles-Tervueren et qui rend ce parcours aisé et agréable autant pour les piétons que les cyclistes.



Passerelle pour piétons et cyclistes assurant la continuité de leurs parcours.
(Photos : S.Reiter).

Cette promenade du chemin de fer devrait s'intégrer dans une continuité verte de grande envergure : la « promenade verte », qui devrait permettre de faire un tour complet de la Région de Bruxelles-Capitale sans quitter un itinéraire balisé de 63km de long, sûr et agréable pour les piétons et les cyclistes. Des tronçons importants existent mais ils ne sont pas encore reliés les uns aux autres.

Les mesures suivantes sont importantes pour favoriser une politique de valorisation des modes de transport plus écologiques que la voiture individuelle :

- la planification et le développement, très en amont du projet d'urbanisation, des transports publics. Les arrêts devraient être distants de 300 et 700 mètres maximum des commerces et des services.
- la création de sites propres ou de rues réservées aux transports publics.
- la réduction du nombre de places de stationnement pour les voitures.
- la limitation de la vitesse de circulation automobile à l'intérieur des quartiers.
- la création d'axes piétons et de pistes cyclables, agréables et bien éclairés, reliant les différents quartiers et zones urbanisées.
- l'aménagement de nombreux parkings pour vélos.



Valorisation des modes de transport écologiques (Photos : S.Reiter).

Les espaces publics urbains remplissent également différentes fonctions écologiques étroitement liées aux questions de gestion des ressources naturelles, dont la maîtrise des eaux pluviales, l'augmentation de la diversité biologique et la purification de l'air. Ces différentes fonctions devraient être visibles dans les espaces collectifs.

Notre planète se distingue par une grande diversité de vie à la fois visible et invisible. La biodiversité est l'ensemble du vivant, des plantes, des animaux, des organismes microscopiques et de leurs gènes, mais aussi les différents paysages naturels, constitués d'une infinité d'écosystèmes de taille variable allant de la flaque d'eau à la forêt. La diversité des espèces qui peuplent un espace donné reflète l'état de santé de cet écosystème. L'homme, espèce parmi les autres, fait partie de la biodiversité. Nicolas Hulot nous rappelle que: « *Protéger la biodiversité, ce n'est pas seulement protéger les petites bêtes, c'est aussi et surtout sauvegarder les systèmes naturels qui forment le support de la vie humaine* ». Ainsi, assurer la biodiversité dans nos villes est un des enjeux du développement durable.

La biodiversité contribue fortement à notre vie sur terre grâce à :

- l'alimentation qu'elle nous fournit,
- la production d'une base pour la moitié des médicaments que nous utilisons,
- la conservation d'un patrimoine génétique,
- la régulation des climats et de l'effet de serre,
- l'épuration de l'air,
- la production d'eau de source,
- le réapprovisionnement des nappes phréatiques,
- la décomposition et le recyclage des déchets
- la formation des sols arables, la protection des sols contre l'érosion et le maintien de leur fertilité
- le maintien des cycles biogéochimiques (fixation du carbone de l'atmosphère et production de l'oxygène)
- l'équilibre de la biosphère
- la fourniture d'agents de pollinisations et d'agents anti-parasitaires...

Plus un écosystème est diversifié, plus il est productif, plus il est stable et plus vite il se reconstitue après une catastrophe naturelle (tempête, sécheresse,...). Les écosystèmes trop dégradés finissent par ne plus assurer leurs fonctions et les services qu'ils rendent aux sociétés humaines. A l'heure actuelle, l'impact des activités humaines est tel que le rythme d'extinction des espèces s'est fortement accéléré, entraînant un appauvrissement du vivant. N'oublions pas que les destins de l'homme et de la nature sont intimement liés ! Il est donc temps de protéger la biodiversité sur terre, y compris au sein de nos urbanisations.

Pour agir avec efficacité en faveur de la biodiversité, il est important d'établir une planification concernant directement le développement de la biodiversité en milieu urbain mais aussi d'intégrer cette problématique dans les plans de développement de la ville et autres plans d'urbanisme.

A Bruxelles, divers types de plans directement orientés vers le développement de la biodiversité sont produits par l'IBGE (Institut Belge de Gestion de l'Environnement). Des sites naturels classés, tels que le Bois de Laerbeek et la Forêt de Soignes, et des réserves naturelles, comme le Vuilbeek et le

Rouge-Cloître, ont fait l'objet de plans de gestion dans le but d'y développer la biodiversité.

Signalons une initiative spécialement intéressante en Région de Bruxelles-Capitale: la planification de trois réseaux de maillages qui sont le maillage vert social, le maillage vert écologique et le maillage bleu. Le graphe ci-dessous présente une carte de situation de ces maillages vert et bleu de la Région de Bruxelles-Capitale.



Maillage vert et maillage bleu de la Région de Bruxelles-Capitale (IBGE 2002)

Le maillage vert social a pour objectif premier de favoriser l'accès du public à des espaces verts au sein de la ville. Il propose la création de nouveaux parcs publics, la réalisation d'un verdoisement volontariste, la formation d'une promenade verte autour de la ville et la réalisation de continuités vertes rayonnantes et concentriques. Le maillage vert écologique vise à recenser et évaluer l'ensemble des sites d'intérêt pour la biodiversité en ce compris les continuités vertes permettant la pénétration des espèces dans la ville. Le maillage bleu est étroitement lié au maillage vert social auquel il contribue. Son objectif est de reconstituer un réseau hydrographique de qualité en Région de Bruxelles-Capitale. Il vise à valoriser et développer la valeur écologique, paysagère et récréative du réseau hydrographique. Il s'agit par exemple de remettre à ciel ouvert des ruisseaux, ce qui a déjà été réalisé pour la Woluwe, ou de séparer les eaux usées et les eaux de ruissellement. (De Schutter et al. 2000)

Ces maillages visent à augmenter le nombre d'espaces de nature en ville et leurs interconnexions ainsi qu'à rendre un maximum d'espaces verts multifonctionnels et à favoriser la mobilité douce (vélos, piétons) dans la Région de Bruxelles-Capitale. Ces continuités naturelles devraient également préserver le patrimoine biologique et accroître la biodiversité, notamment en permettant la circulation et la conservation des espèces de plantes et d'animaux sauvages présentes dans la ville et en favorisant tant que possible une pénétration et un maintien de la vie sauvage à l'intérieur de la ville, par une protection significative des talus de chemin de fer et des berges de cours d'eau.

1.3.3 L'ouverture

Les espaces publics sont des espaces d'apprentissage de l'altérité. Le philosophe Emmanuel Lévinas parlait de « proximité de l'inconnu » et l'expression traduit bien l'aspiration que nous devrions avoir en concevant nos cités.

« Les espaces publics ne sont pas des espaces communautaires dans le sens où ce ne sont pas des espaces où se retrouvent uniquement des gens appartenant à la même communauté – même s'ils peuvent offrir la possibilité à des gens d'une même communauté de se retrouver. Ils se caractérisent par leur capacité à éloigner l'individu de sa communauté en lui permettant de se distancier de la communauté pour apprendre à reconnaître les différences mais aussi les ressemblances avec les autres. Cette capacité d'apprentissage de l'autre, de ce qui n'est pas soi, provient de la puissance de l'anonymat que peut offrir l'espace public. C'est justement ce que distingue ou plutôt a distingué pendant des siècles la ville de la campagne, soit la possibilité pour l'individu de s'affranchir de ces liens originels pour s'identifier à une nouvelle communauté, celle de la ville. » (Ghorra-Gobin 2000) Mais pour cela, il faut s'assurer que chacun de nous a les moyens d'y avoir accès, par l'ouverture physique des espaces publics à toutes les types de population.



Ouverture de l'espace public à tous les usagers (Photos : S.Reiter).

L'espace public est par essence un espace accessible n'importe quand- c'est-à-dire n'ayant ni heure d'ouverture, ni heure de fermeture- et par n'importe qui, sans aucune discrimination, pour des activités qui ne sont pas nécessairement explicitement déterminées, à condition que celles-ci se conforment à un règlement d'usage, établi par l'autorité publique. On se trouve donc dans un espace où l'homme a une liberté totale de circulation et où est possible toute interaction libre et non contrôlée entre individus supposés autonomes.



Accessibilité de l'espace public en permanence (Photo : S.Reiter).

Partager les espaces publics est un acte civique indispensable à une société démocratique. Il existe de nombreuses manières d'exclure le 'non-désiré' (ségrégation sociale, ethnique, confessionnelle, sexuelle, générationnelle,...) par une privatisation de l'espace extérieur mais dans tous les cas cela empêche la société d'assumer ses responsabilités communes. Les villes ne sont pas conçues pour nous séparer les uns des autres mais au contraire devraient être créées pour nous relier.

Les villes américaines tentaculaires, avec leurs ghettos, leurs cités-dortoirs pour la classe moyenne étroitement surveillées par la police, leurs centres commerciaux et parcs d'activités, révèlent très clairement cette tendance à la division et à la privatisation de l'espace public. Citons à ce propos Richard Rogers : « *La situation à Houston est inquiétante. Tout un réseau de rues souterraines – long de 10 kilomètres- a été creusé sous le quartier d'affaires du centre-ville. Ce fastueux dédale, appelé avec une ironie involontaire le « système de connexion » est totalement privé. On ne peut y arriver depuis la rue mais seulement depuis les halls en marbre des banques et des compagnies pétrolières qui dominent la ville. Il en résulte l'apparition d'un autre genre de ghetto urbain. Les rues pleines à craquer de voitures sont laissées aux pauvres et aux sans emplois alors que les travailleurs aisés font leurs courses et règlent leurs affaires en tout sécurité et dans le confort de l'air conditionné.* » (Rogers 2000) La photo ci-dessous montre à quel point les espaces publics à ciel ouvert de la ville d'Houston sont des non-lieux réservés à la voiture. En effet, plus de 70% du sol de ce quartier est couvert par les zones de circulation et de parkings. Ainsi, ces espaces publics délaissés et inhumains sont véritablement l'enjeu d'une grave discrimination sociale.



Espaces publics à Houston. (Kostof 1992).

Bien que les villes européennes n'en soient pas encore là, il est temps de combattre de telles influences. Le processus d'accaparement de l'espace public par des groupes privés est malheureusement un fait de plus en plus régulier. Signalons les shoppings et autres centres commerciaux qui ont remplacés l'espace de la rue dans

son rapport aux petits commerces de quartier ou bien l'usage de barrières surveillées par des agents de sécurité privés pour contrôler les entrées et les sorties des voitures et des personnes dans certaines rues.



« Shopping mall » (Liébard & al. 2004)

Ces éléments fréquents en Europe ne sont que la première étape d'une privatisation de l'espace public qui peut amener à la formation ultérieure des *condominiums* ou des *gated communities*, véritable féodalisation de la ville qui consiste à construire et aménager des quartiers pour une certaine catégorie sociale homogène, où la présence d'un certain nombre d'infrastructures (de transport, de communication, énergétique,...), de services (banques, magasins, restaurants,...) et d'équipements urbains (écoles, parcs, hôpitaux, églises...) permettent le déroulement d'une vie en autarcie à l'intérieur de son quartier, sans plus se déplacer vers l'extérieur, renforçant la ségrégation urbaine. Un exemple de ce type de quartiers est le parc de Maisons-Lafitte en Yvelines (France). On compte actuellement aux Etats-Unis plus de 20 000 gated communities (communautés clôturées), qui abritent environ 8 millions d'américains, ce qui correspond à quelques 3 millions de logements (Ghorra-Gobin 2000 - b) Ces espaces sont des non-lieux dans le sens où ils ne permettent pas la rencontre de l'autre.

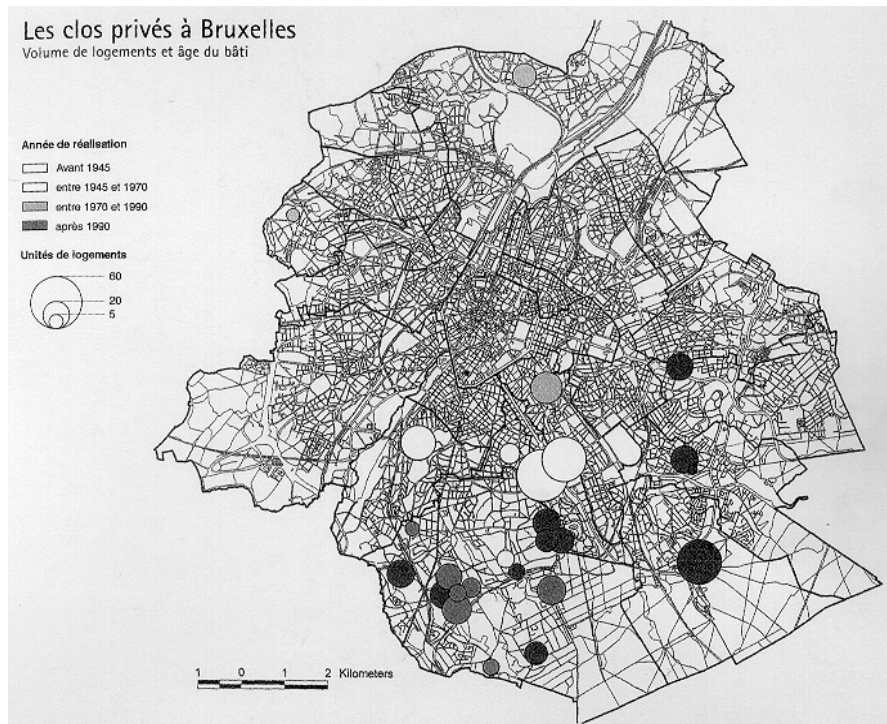
Des espaces résidentiels fermés généralement baptisés du concept de 'clos' existent également en Belgique. Dans la ville, l'espace public tisse des liens avec l'espace privé. Dans les clos et lotissements homogènes, il y a perte réciproque. La vie de l'espace public se compose de surprises et de découvertes ; autrement dit, les rues et les places doivent être des lieux ouverts sur l'étranger.

Les photos ci-dessous ont été prises à Limelette en Wallonie: elles sont révélatrices d'une privatisation assez courante de l'espace public qui engendre l'exclusion de l'altérité et donc l'impossibilité de construire une identité collective. Ce type de phénomènes se retrouve partout en Belgique.



Privatisation de l'espace public (Photos : S.Reiter).

Le graphe ci-dessous représente un recensement des clos dans la région de Bruxelles-capitale, en fonction de la date de leur construction. N'ont été recensés dans cette étude de Jean-Michel Decroly et d'Yves Rouyet que les clos et rues dont le statut est privé et qui se caractérisent par la présence de barrières ou grilles barrant la voirie d'accès principale, de clôtures entourant l'espace résidentiel, de gardiens à l'entrée ou au moins d'une signalisation ou d'un aménagement dissuasif. Il est vrai que leur nombre reste modeste mais il augmente de manière significative depuis une décennie. A l'exception des réalisations les plus anciennes, les clos se localisent très majoritairement dans la seconde couronne urbaine, en particulier dans le quadrant sud-est de la Région. (Decroly & Rouyet 2002)



Répartition des clos privés en région de Bruxelles-Capitale (Decroly & Rouyet 2002)

La crise de la territorialité que nous traversons se traduit par des appropriations excessives de certaines zones et inexistantes dans d'autres. En effet, dans les nouvelles « villes privées », les lotissements surveillés et les rues commerçantes fermées la nuit, on assiste à une appropriation excessive d'un espace par un groupe social au point d'aboutir à un phénomène d'exclusion des autres individus. A l'inverse, de nombreux territoires non rentables, mal desservis et sous équipés sont délaissés et non appropriés. Les tags et graffitis qui envahissent de nombreux sites urbains déshumanisés montrent une tentative désespérée de s'approprier les éléments d'un territoire et d'y introduire une marque humaine.



Le square des Ursulines à Bruxelles : un lieu que ce sont appropriés les jeunes du quartier. (Photos : S.Reiter)

Ainsi, le processus contemporain d'appropriation des espaces publics, oscillant entre fermeture et abandon, interroge notre capacité à « faire société » et à donner un sens à l'espace public comme lieu de démocratie, d'équité sociale et d'ouverture à la rencontre de l'autre.

Créer de la coexistence, c'est aussi assurer une convivialité qui assure une structure de communication et la possibilité d'appropriation pour une vie individuelle et collective. L'appropriation rassemble l'ensemble des conduites, des actes, des modes d'usage et de transformation, introduits par les habitants, de manière spontanée et par leurs propres moyens pour adapter leur quartier, leur habitation et leur environnement à leur mode de vie idéal.

En termes purement théoriques, il existe deux types d'appropriation : l'appropriation réelle et l'appropriation symbolique. Chacune présente différents degrés de profondeur et diverses façons de s'exprimer dans l'espace. Par appropriation réelle, il faut sous-entendre le développement d'activités et les comportements d'utilisation du milieu. Par appropriation symbolique, il faut considérer les 'symboles' et les 'signes' qui visent à montrer l'identité, les idées et les valeurs des occupants du milieu. Tout aménagement devrait rester ouvert à l'appropriation.



Différents types d'appropriation de l'espace public (Photos : S.Reiter).

Une caractéristique qui manque souvent dans les espaces urbains dessinés par des architectes modernes, c'est la possibilité du choix et de l'improvisation : les gens devraient pouvoir utiliser les mêmes espaces de plusieurs manières différentes, y compris selon des usages pour lesquels ces espaces n'ont pas été explicitement dessinés. Soit par la forme, soit par l'échelle, un lieu permet l'improvisation et la variété des utilisations : il se révèle être à la disposition des habitants.



Ouverture à l'improvisation (Photo : S.Reiter).

Ainsi, tout élément qui permet des interprétations multiples est à valoriser. Les chaises de Bryant Park à New York sont l'unique mobilier urbain de cette "pièce dans la ville". Simples objets fonctionnels, les chaises induisent une multitude de possibilités d'appropriation adaptées à chaque situation : utilisation individuelle, rassemblement de petits groupes, célébration publique, ...



Les chaises de Bryant Park à New York. (Reiter 2003).

Un autre exemple d'aménagement ouvert à l'interprétation est une intervention plastique et ludique installée autour du complexe des logements sociaux des Brigittines à Bruxelles. Il s'agit d'une structure de 140m de long couverte de bois peint en rose et formant des dessins et fonctions diverses. Ainsi, cette bande colorée souligne le site, devient chaise, banc, table ou parfois simple ligne de couleur pour égayer l'espace public, offrant ainsi des possibilités d'appropriation multiples.



Possibilités d'appropriation multiples (Photo : [www. recyclart. be](http://www.recyclart.be)).

L'ouverture est aussi une caractéristique intrinsèque de l'espace public, du fait qu'il n'est pas prédéfini une fois pour toutes mais qu'il est au contraire l'objet d'une construction sociale et qu'il est donc toujours en cours de production. Achever une réalisation n'est devenu une obligation qu'au siècle dernier. Le lieu,

soumis aux continuelles modifications de l'existence, ne doit pas forcément proposer un aspect achevé. Selon Claudel, « *Il y a dans tout rassemblement humain, dans toute société, ce que l'écriture appelle une ville, dans toute conjuration d'âmes, d'efforts et de traditions, un germe de destruction qui est précisément celui de son développement.* »

La complexité, les incertitudes, les ambiguïtés, les paradoxes, les vocations secondaires, les contradictions, les chevauchements, les connexions partielles par un enchevêtrement permanent de milieux tampons, tout cela est nécessaire pour enrichir nos espaces publics et offrir des opportunités d'adaptation et d'appropriation. Ainsi, les « squares » de Manhattan formés par les intersections de la diagonale unique de Broadway – par exemple Madison, Union, Herald et Times Squares – sont devenus des lieux particuliers chacun avec son caractère individuel, ce qui ajoute vitalité et tension à la grille qui recouvre la ville. La diagonale contradictoire par rapport au plan quadrillé typique des villes américaines apporte vitalité et mouvement. Venturi nous rappelle que « *L'ambiguïté favorise la richesse de signification au dépens de la clarté de la signification.* » (Venturi 1999)

Une certaine souplesse est requise pour permettre les évolutions et les changements majeurs, comme pour faciliter les adaptations quotidiennes. Il est judicieux de prévoir des possibilités d'adaptation multiples.

Il est également important de prévoir des espaces propices à des mouvements libres dont la flânerie est un aspect. La place d'armes de Namur présente une grande étendue libre de tout mobilier. Elle offre ainsi la possibilité réelle d'y accueillir de très nombreuses activités à caractère culturel, commercial ou festif, telles qu'une fête foraine, le Festival du film de Namur, le marché de Noël,... Le bois y constitue un revêtement de sol chaleureux qui délimite la place et invite les citadins à se l'approprier et à y improviser.



La place d'Armes à Namur (Photos : S.Reiter).

Rappelons la nécessité de petits espaces sans affectation particulière, offerts à l'inattendu. Si l'espace est totalement prédéterminé, cela risque d'engendrer l'ennui et de limiter les opportunités de créer des événements particuliers.

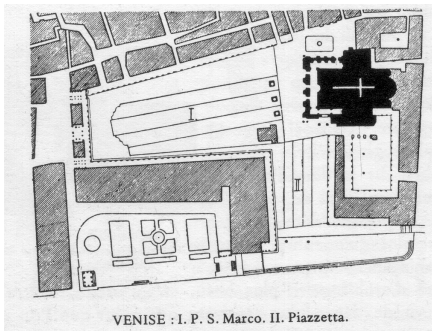
La photo ci-dessous donne l'exemple d'un événement urbain temporaire : un tapis de fleurs couvre le centre de la Grand Place à Bruxelles. L'ouverture des espaces publics est donc aussi cette capacité à laisser advenir des moments particuliers. Cependant, certains lieux nécessitent une plus grande structuration que d'autres et il est indispensable que des points forts soient présents en permanence dans le tissu d'une ville.



La Grand Place de Bruxelles : ouverture à un événement temporaire (Photo : S. Reiter).

Ajoutons que notre époque a fait foisonner un nombre important de normes qui laissent peu de place à l'innovation et à l'ouverture. Si ces normalisations ont l'avantage de fournir des repères, elles se concentrent généralement davantage sur les moyens techniques utilisés que sur le résultat final obtenu. Signalons par exemple toutes les normes urbanistiques qui déterminent des gabarits et des types de matériaux à utiliser, freinant la créativité architecturale sans assurer réellement la création d'un milieu construit unifié et appropriable. Elles sont généralement assez figées et valorisent surtout l'apparence au détriment de l'essence. Ainsi, au niveau du développement durable, ce type de normalisations risque de créer des architectures basées sur une image durable alors qu'il s'agit au contraire de s'ouvrir aux particularités de chaque situation locale et aux évolutions de son milieu.

Enfin, tout lieu implique un dépassement vers « ailleurs ». Cette ouverture indispensable aux espaces publics dépasse notre cadre physique. De nombreux lieux rendent accessibles certaines réalités sans que notre corps y soit nécessairement engagé. L'accès immédiat, corporel et direct, se double d'un accès à distance et indirect. Une solution splendide du problème de coexistence à travers une ouverture est offerte par la Place Saint-Marc à Venise qui ouvre véritablement la place sur le grand canal et la lagune, éléments du paysage qui ne sont pas visibles depuis la place (Gilot 1995).



Place Saint-Marc à Venise : ouverture sur le paysage environnant (Plan : Sitte 1996).

L'ouverture d'un espace public exige des interactions entre ce lieu et d'autres espaces ou lieux de son milieu. Toute place doit s'insérer dans le tissu urbain et dans un réseau de places. Un des problèmes de Bruxelles se situe à ce niveau : les connexions entre lieux sont mauvaises. La liaison entre le sablon et la Grand Place par exemple fait totalement défaut. Le Mont des Arts crée toutefois une liaison intéressante entre le haut et le bas de la ville.



Mont des Arts, Bruxelles. (Photo : S.Reiter)

A Rome, l'urbanisme de Sixte Quint a introduit un réseau de lieux interconnectés dont les obélisques sont les nœuds. Ainsi, l'obélisque situé devant l'église de la Trinité-des-Monts ouvre une perspective et nous inscrit avec finesse au centre de ce réseau de lieux. La position oblique de cet obélisque par rapport à la façade de l'église nous rappelle que son rôle premier est celui de créer des liens dans le tissu urbain : son orientation n'est donc pas soumise à la morphologie locale mais bien à la direction urbaine qu'elle souligne. Ailleurs et ici se rejoignent en un même lieu.



L'église de la Trinité-des-Monts (Photos : S. Reiter).



Les obélisques reliant les espaces publics de Rome. (Photos : S.Reiter).

En Allemagne, Fribourg est une ville fluviale construite au bord du Dreisan, qui coule à la limite du centre historique. Le plan ci-dessous nous montre le centre de la ville de Fribourg où nous pouvons apprécier les « Bäckle » (en bleu marine), un système de petits canaux d'eau qui se répètent dans l'espace public de Fribourg. Les espaces urbains du centre-ville sont reliés architecturalement à travers cette réinterprétation de l'ancien système de petits canaux d'approvisionnement en eau et d'égouttage qui traversait Fribourg. Les petits canaux actuels ont une largeur de 20 à 50 cm et une profondeur de 5 à 10 cm. La grande quantité de canaux qui parcourent la ville la transforme en un merveilleux terrain de jeux pour les enfants... Les deux photos ci-dessous montrent comment ces petits canaux créent un lien continu qui invite les piétons à se promener dans le centre.



Les « Bäckle », Fribourg. (Plan et photos : Reiter 2003).

Tout quartier interagit avec les zones qui le jouxtent ainsi qu'avec les autres échelles du territoire urbanisé (ville, région, pays, planète). Il est important que ces liens soient perceptibles afin que chaque citoyen se sente à la fois habitant d'un quartier, d'une ville ainsi que de la planète pour qu'il n'existe pas de terrain exclu du processus de développement. Pour garantir des échanges de ressources et d'informations entre quartiers, villes et territoires, il est important que ces systèmes soient ouverts et perméables.

Le développement durable de nos urbanisations nécessite de prendre en compte le contexte global de mondialisation dans lequel nous nous inscrivons. Il est toutefois important de ne pas confondre mondialisation et globalisation. La mondialisation est un phénomène qui s'enracine dans l'histoire de l'humanité et qui s'accélère depuis le 15^{ème} siècle, c'est-à-dire depuis la découverte de l'étendue des territoires terrestres grâce aux grandes explorations. La mondialisation est à l'heure actuelle un processus inévitable qui fait partie du développement de l'humanité terrestre. La mondialisation peut très bien se vivre de manière équilibrée si nous lui donnons le temps de se développer et d'intégrer la richesse des diversités naturelles et culturelles. La globalisation est une évolution accélérée et nuisible de la mondialisation. Le processus de globalisation recouvre l'ensemble des pratiques qui accélèrent la mondialisation en annihilant les différences naturelles et culturelles locales. Si la globalisation doit être évitée à tout prix, en urbanisme et en architecture comme dans toutes les disciplines humaines, la mondialisation offre par contre, si son rythme est naturel, une ouverture à l'autre dans la diversité, ce qui est indispensable au développement durable de notre humanité sur Terre.

1.4 Cohérence

Aujourd'hui, notre civilisation est centrée sur la résolution des problèmes quantitatifs (croissance économique, technologie, ...) en niant les aspects qualitatifs du développement de l'humanité (évolution sociale et culturelle, éthique de société,...) Il est donc temps de proposer des solutions de progrès humain. Nous ne voulons pas dévaloriser les aspects techniques et quantitatifs inhérents aux problèmes d'urbanisme actuels mais nous désirons les réintroduire dans une hiérarchie cohérente où les aspects humains sont reconnus à leur juste place.

Après avoir développé en quoi tout espace public doit être coexistence, il est indispensable de compléter notre propos par le fait que pour être identifié comme lieu cet espace public doit être perçu comme un ensemble harmonieux.

L'espace public est par essence un parti cohérent gagné contre des résistances. La cohérence de notre habiter est une **identité porteuse de sens** qui trouve son expression dans l'unité de ses intentions.



Écoutons Venturi, qui n'arrête pas de nous dire que l'architecture et la ville sont complexes et contradictoires, nous rappeler l'importance d'un ordre cohérent susceptible de créer une unité à travers cette complexité : « *Mais il est un impératif absolu auquel une architecture fondée sur la complexité et la contradiction est spécialement tenue d'obéir : on doit la considérer comme un tout. L'unité qu'elle doit incarner est celle qui tient compte de tout, même si c'est difficile, plutôt que celle qui exclut, bien que ce soit plus facile* » (Venturi 1999). Ainsi, la cohérence n'est pas une uniformisation simpliste mais bien l'unité complexe générée par l'interpénétration des échelles de l'habiter et de la subjectivité humaine.

Un lieu peut présenter de violentes contradictions d'échelle, de rythmes, de matériaux, de styles,... pourvu qu'il sache les intégrer en un ensemble cohérent. Par contre, la soi-disant unité des petites maisons quatre façades de nos lotissements suburbains est incapable de fonder une cohérence réelle basée sur des interactions multiples. Les espaces publics des zones suburbaines sont pratiquement toujours des déserts informels et inappropriables.

Aujourd'hui, repenser nos urbanisations dispersées implique d'y réintroduire de la cohérence : nous devons structurer nos espaces publics pour leur offrir l'**identité**, le **sens** et la **naturalité** dont nous avons tous besoin. C'est le manque de relations des espaces contemporains qui rend impossible l'existence d'un sentiment d'appartenance aux lieux collectifs. Les photos ci-dessous permettent de comparer la richesse de la véritable cohérence d'une place urbaine complexe et la pauvreté de la fausse cohérence des zones d'habitat dispersé.



Place cohérente (Paris)
(Photos : Reiter 2003).



Fausse cohérence (brabant wallon)

Les paragraphes qui suivent analysent ce concept de cohérence, qui qualifie un lieu de sa nature singulière, à travers les notions d'identité, de sens et de naturalité.

1.4.1 L'identité

Pour créer un lieu, il ne suffit pas qu'un espace public produise des avantages collectifs modifiant les possibilités réciproques des intervenants ; il ne devient réellement lieu que dans la mesure où s'induit à son propos un processus d'identification collective. Le lieu est alors perçu comme une unité sociale spécifique, dotée d'une singularité qui la distingue de tout autre lieu (Remy & Voye 1981).



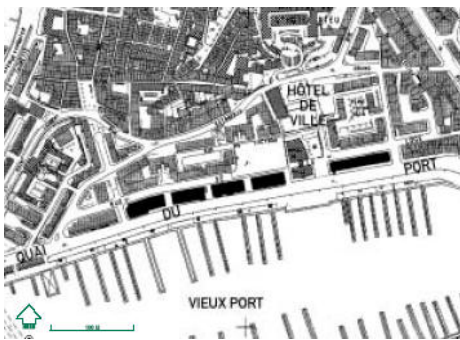
La place Saint-Pierre à Rome (Photo : S.Reiter).

L'homme a un profond besoin de se situer en affirmant son identité. L'architecture et l'urbanisme se révèlent être support d'identité par l'intermédiaire de la création de lieux d'appartenance auxquels l'être humain peut s'identifier. Bien sûr, l'environnement construit n'est qu'un des éléments qui participent à la construction de cette identité mais son influence ne doit pas être négligée. Le lieu doit posséder une identité qui à la fois le délimite, le structure et le caractérise.

Bâtir, c'est d'abord définir une portion de territoire distincte du reste de l'univers. La limite fait naître l'intérieur et l'extérieur. Rappelons la définition qu'Heidegger donne de la limite : « *La limite n'est pas ce où quelque chose cesse, mais bien, comme les Grecs l'avaient observé, ce à partir de quoi quelque chose commence à être.* » (Heidegger 1958). Les espaces qui n'ont pas de limites nettes ont beaucoup de mal à devenir des lieux. Un exemple typique est celui de la majorité des espaces publics des lotissements suburbains qui se diluent sans frontière et nous empêchent ainsi de les percevoir comme des lieux dignes d'appropriation.

Les immeubles du quai du port à Marseille, conçus par Fernand Pouillon, forment un ensemble architectural qui associe un travail de fond sur l'identité architecturale

ainsi que sur l'identité urbaine. Cet ensemble d'édifices offre une « façade » au vieux port de Marseille en y dessinant une limite claire. Ce projet est constitué de longs bâtiments distincts mais unifiés par un langage architectural commun, alignés pour redonner un front au quai. Le matériau utilisé est la pierre blonde du Pont du Gard qui souligne l'identité locale des bâtiments et l'importance historique du site sur lequel ils s'implantent. Cette magistrale séquence urbaine qui encadre l'hôtel de ville est renforcée par une longue galerie commerciale à arcades au niveau du rez-de-chaussée. La rigueur de cette composition scandée d'axes verticaux lui donne un caractère intemporel et participe à l'affirmation de son identité structurée. Ainsi, Pouillon prouve dans ce projet son aptitude à associer construction, architecture et forme urbaine. Il en résulte un ensemble d'une cohérence remarquable et d'une cohésion incontestable, qui admet toutefois des appropriations diverses au sein de sa structure. Le plan ci-dessous montre les immeubles du quai du port en noir et les photos qui l'accompagnent illustrent les diverses qualités architecturales et urbaines de cet ensemble cohérent.



Plan d'implantation des immeubles du quai du port à Marseille – architecte : F. Pouillon.



Cohérence à l'échelle de la ville (Photo : S.Reiter).



Cohérence à l'échelle du quartier et de l'espace public (Photos : S.Reiter).



Cohérence à l'échelle de l'architecture (Photos : K. de Myttenaere).

La place est d'abord identifiée par sa forme urbaine mais ses limites peuvent être plus ou moins explicites. Un mur ou un ensemble de bâtiments constituent des frontières continues. Ainsi, la place des Vosges à Paris, espace carré totalement construit sur toute la longueur de ses côtés, offre d'emblée une identité cohérente. Mais une limite peut aussi être établie à partir d'éléments qui suggèrent plutôt qu'ils ne marquent cette différenciation entre intérieur et extérieur. Pour Alberti, « *les colonnades ne sont rien d'autre qu'un mur ajouré* ».



Limites définies par des colonnades. (Photos : S.Reiter).

Les bâtiments qui entourent une place ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres car chacun d'eux joue un rôle important dans la définition de l'espace collectif. Le parcellaire, par la rythmique qu'il engendre, et la mitoyenneté par sa fonction de limite continue sont des éléments très importants de cohésion de l'espace public. Retrouver des lieux dans nos urbanisations dispersées passe par une nécessaire réunification des bâtiments. Lorsqu'une continuité ordonnée des constructions est impossible, on peut utiliser la végétation et la continuité des sols pour recréer des limites. Le logis Floréal est un bon exemple d'un tissu urbain peu dense où l'identité de l'espace public est assurée à la fois par la continuité des constructions et par le jeu de la végétation.



Le logis Floréal à Bruxelles : limite végétale. (Photo : S.Reiter).

Ainsi des colonnes, un alignement précis, une rangée d'arbres ou un travail du sol peuvent être conçus comme le franchissement d'un seuil. Délimiter une place dépend donc moins de la proportion des parois pleines et vides que de la nature de ces parois et de leurs relations avec les autres éléments du paysage.

A l'heure actuelle, la ville diffuse n'a plus de limites. Réintroduire des « effets de portes » à la périphérie des villes permettrait non seulement de mieux définir où la

ville commence et où elle s'arrête, mais aussi d'apporter un caractère symbolique important à l'identification des citoyens, renforçant leur sentiment d'appartenance à leur ville.

Malgré les désastres habituels de la périurbanisation, dans les zonings industriels comme dans les lotissements résidentiels, il y a lieu de repenser les lignes de force de l'urbanisme, en recréant autant que possible des alignements cohérents, un rythme dans les vides et dans les pleins, une axialité et une hiérarchie qui donnent force et attraction à la chaussée et ses trottoirs.

Un projet contemporain de requalification cohérente à l'échelle de l'urbanisme, est le réaménagement du village Monte Carasso (2300 habitants) qui se trouve à proximité de la ville de Bellinzone dans le canton du Tessin. En 1978, la Commune de Monte Carasso fit appel à l'architecte Luigi Snozzi afin d'étudier l'emplacement de la nouvelle école primaire dans l'ex-couvent au centre du village, en alternative à l'emplacement prévu en périphérie à proximité de l'autoroute. Appelé pour un travail apparaissant dans un premier temps comme une simple intervention de restauration et de réutilisation de la principale structure significative et monumentale du village, Snozzi en profite pour développer une proposition globale de requalification de la zone. Le but de son intervention est de démarquer le village de Monte Carasso de l'agglomération débordante de Bellinzone et de le structurer pour lui redonner une cohérence malgré les constructions désordonnées de ces dernières décennies.

Ce nouveau plan fixe les principes de la redéfinition par étapes du cœur du village, espace public par excellence. Une telle proposition est fondée surtout sur le principe d'une délimitation claire du centre monumental, délimitation mise en évidence physiquement aussi bien par la création de vides, par le réaligement de routes et voiries, que par l'édification de bâtiments précis et significatifs, aptes à valoriser ce nouveau centre requalifié. Ainsi, autour du centre historique, se construit progressivement une ceinture intérieure de bâtiments. Parallèlement, le principe de l'extension future du village est conçu sous forme d'une densification forte du tissu historique existant pour éviter la dissémination de nouveaux bâtiments sur le territoire.

Aujourd'hui, la commune a révisé son plan d'aménagement qui offre désormais d'excellentes conditions pour une densification et un développement d'espaces publics de grande qualité. Grâce au souci de cohérence de son travail à toutes les échelles, l'architecte Luigi Snozzi, en collaboration avec d'autres architectes de la région comme Mario Botta, a réorganisé l'urbanisme de cette commune suisse de façon profonde et réfléchie.



Vues de la cour rénovée du couvent des Augustines à Monte Carasso
(Photos : Philippe Peyrefitte)

Donner une identité implique de créer un ordre selon lequel les éléments sont distribués dans des rapports de coexistence. Il existe différentes manières de structurer le bâti. La hiérarchie, par exemple, est un art qui agit sur la dépendance entre les éléments en vue d'établir une cohérence. Le rythme est aussi un principe de composition architecturale et urbanistique bien connu pour créer de la cohérence. Enfin, l'identité d'un lieu peut également naître d'associations multiples entre éléments constituant l'ensemble, comme par exemple les jeux de proportions. Selon Pierre von Meiss, « *l'appartenance est renforcée par la répétition, la ressemblance, la proximité, la clôture commune, la symétrie et l'orientation des parties* » (von Meiss 1993).

Notons que les bords sont des éléments essentiels en architecture: la base instaure notre contact au sol, les angles créent des interactions entre surfaces et enfin corniche et toiture marquent notre liaison au ciel. Ces différentes bordures présentent donc un enjeu important dans la définition de l'identité d'un espace.

Enfin la cohérence formelle est un élément à prendre en compte. L'unité des matériaux et des textures est un exemple de caractéristiques partielles qui renforcent la tendance à la cohérence malgré la singularité de chaque construction. Une homogénéité du mobilier urbain est aussi à conseiller. Toutefois, nous sommes d'accord avec P. von Meiss pour dire qu' : « *il faut signaler que l'unité sémantique peut parfois remplacer la cohérence formelle.* » (von Meiss 1993). Ainsi, la construction d'une place commencée dans un style et poursuivie dans un autre style peut apparaître unitaire, malgré ses disparités stylistiques, si c'est la forme de la place et l'idée même de la place comme totalité de sens que l'on perçoit en priorité.

Les exemples ci-dessous représentent des moyens de créer une identité de place publique. Malgré la circulation locale présente sur trois de ses côtés, la place des Célestins à Lyon offre un espace intime et chaleureux en plein cœur de la ville, face au théâtre des Célestins (Gillon 2002). La place Saint-Lambert à Liège est marquée par le choix chromatique du pavement en pierres naturelles qui est en harmonie avec la tonalité générale du Palais des Princes-Evêques.



La place des Célestins (Gillon 2002)



La place Saint-Lambert (Photo : S.Reiter)

A l'échelle de la ville, on peut prendre l'exemple de Louvain-la-Neuve pour la création d'une cohérence urbaine. A Louvain-la-neuve, de nombreux éléments urbanistiques ont été introduits dès le début du projet afin de renforcer la cohérence de la nouvelle ville. L'implantation de la ville dans une vallée et le schéma de structure de Louvain-la-Neuve ont permis à la ville de se développer tout en offrant une visibilité des différents quartiers vers le cœur de la ville. La continuité du bâti et la création d'espaces publics de qualité accentuent la perception que la ville définit réellement une communauté d'êtres humains. Toutefois, la typologie et le vocabulaire architectural de Louvain-la-Neuve sont souvent trop uniformes, ce qui

fige un peu la ville dans un caractère artificiel. L'idéal est de trouver une cohérence urbaine globale qui ne limite pas l'expression individuelle.



La cohérence du bâti de Louvain-la-Neuve. (Photos : S.Reiter).

La notion d'échelle est importante dans la question de l'équilibre à trouver entre ordre et désordre. L'appropriation introduit un degré de désordre qui n'est acceptable que si l'échelle supérieure de l'espace en question permet de retrouver un certain niveau de cohérence, nécessaire à l'appropriation de cette échelle supérieure. Par exemple, la diversité des façades des maisons représente une appropriation à inscrire dans une cohérence à l'échelle supérieure telle que la structure d'une place. Ci-dessous, le « désordre » engendré par l'appropriation de l'espace des Ramblas à Barcelone pendant le marché est rendu possible par la cohérence de son cadre bâti.



Les Ramblas à Barcelone (Photo : S.Reiter).

Le discours de Pierre von Meiss est encore une fois intéressant à ce sujet : « *Une fois quelques principes de cohérence bien établis, on découvre qu'il y a place pour d'énormes variations particulières. Ces observations montrent l'extrême fragilité théorique des règlements d'urbanisme qui prétendent de plus en plus préserver la ville et les villages de l'arbitraire de certaines architectures contemporaines. L'effort peut être louable mais les moyens utilisés beaucoup trop primitifs: alignements stricts, couleur et matière de façade, hauteur d'étage et de corniche, genre de tuile.* » Aucune architecture vraiment contemporaine ne peut naître de telles contraintes. Nous affirmons qu'il est indispensable de recréer des espaces publics cohérents mais que cela n'implique pas forcément une similitude de tous les éléments formels.

Le parcellaire de nombreuses rues des centres-villes européens traditionnels est un bon exemple de ce qui peut rassembler et créer un sentiment d'unité tout en respectant le besoin d'individualité. Ce parcellaire unit par sa mesure et individualise au travers de la palette de façades toutes différentes l'une de l'autre qui s'y insèrent. Chaque ville ou quartier possède ainsi son mode d'articulation

entre l'individu et le collectif qui permet à leurs identités respectives de se définir dans le respect du caractère unique de chaque être et la reconnaissance de son appartenance à une échelle collective qui l'aide à exister en tant qu'individu. Le respect de ces typologies quand elles existent ou l'instauration d'un ordre nouveau quand elles sont absentes est nécessaire à l'établissement d'espaces publics cohérents favorisant l'existence humaine dans ses dimensions d'individu et d'appartenance à une collectivité.

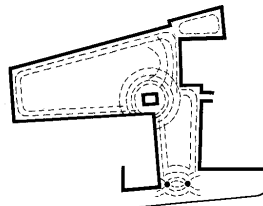
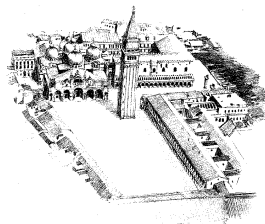
La Casa Battlo, à Barcelone, est un exemple typique d'une architecture qui semble formellement très différente des bâtiments voisins mais qui participe à la création d'un espace public cohérent grâce au respect des gabarits, à la mitoyenneté et à la structuration de la façade par des fenêtres verticales.



La Casa Battlo à Barcelone (Photo : S.Reiter).

La cohérence d'un espace public peut être générée par la relation entre les différents éléments qui le délimitent et l'occupent : bâtiments, colonnes, statue, arbres, pavements,... Un exemple extraordinaire de cohérence spatiale est celui de la place Saint-Marc à Venise, qui offre une interaction complexe réussie entre la spatialité de différents édifices de styles très différents et des contraintes géométriques importantes. Trois procédés architecturaux utilisés dans ce lieu public y assurent une cohérence spatiale de grande qualité : une articulation, une limite poreuse et une avancée architecturale. Les schémas ci-dessous permettent de comprendre comment ce lieu aux formes incongrues a donné naissance à un ensemble urbain magnifique, grâce à la disposition judicieuse de trois éléments spécifiques (von Meiss 1993):

1. le Campanile, qui sert d'articulation entre les deux bras de la place.
2. les deux colonnes placées en front de lagune qui donnent une limite à la place elle-même tout en conservant l'ouverture sur la lagune.
3. l'avancement de l'église Saint-Marc, qui crée une séparation entre les deux espaces urbains, tout en mettant en valeur grâce au parvis de l'église, l'espace qui correspond à l'intersection des deux bras du 'L'. De plus, cette translation de l'église crée une petite place au nord qui résout le problème de ce coin.



(Plans : von Meiss 1993).

1.4.2 Le sens

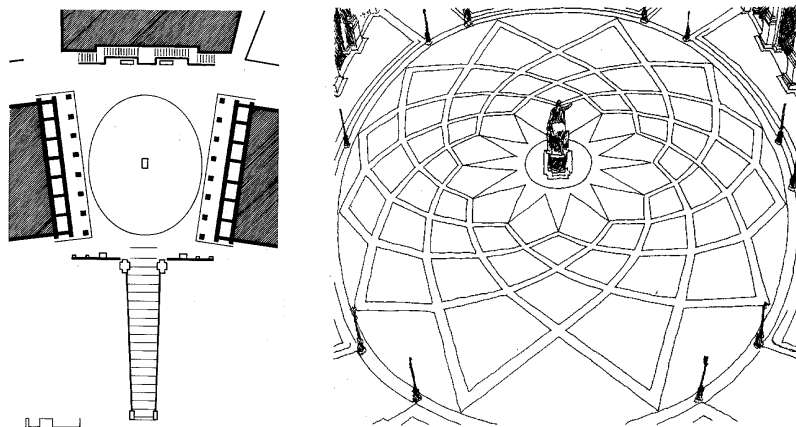
Le sens est un besoin fondamental de l'homme. L'architecture se doit d'aider l'homme à expérimenter son environnement en tant que source de significations, autrement dit de l'aider à habiter. Nous pouvons dire avec Norberg-Schulz que, « *les formes ne « suivent » pas les fonctions, mais constituent plutôt un système qui permet aux fonctions, c'est-à-dire aux actions, d'avoir lieu. Dans ce sens, le langage de l'architecture est un moyen. Nous comprenons aussi qu'il n'est jamais intégralement réinventé ; il s'enracine dans le monde même – lequel englobe l' « être-au-monde » de l'homme.* » (Norberg-Schulz 1988)

Quel qu'il soit, un espace construit est toujours l'expression d'un mode d'habiter. C'est la valeur de ce qu'il exprime qui définit en grande partie sa dimension qualitative. Créer un espace est une manière de créer du sens.

Donnons un exemple d'un lieu urbain qui fait sens grâce à son architecture. La place du Capitole à Rome, réalisée par Michel-Ange au 16^{ème} siècle, est un lieu dont la conception architecturale annonce le rôle particulier du Capitole dans le tissu urbain, à travers un double procédé de mise en valeur architecturale et de détournement du parcours humain individuel (von Meiss 1993). Un axe de symétrie marqué et renforcé par la forme trapézoïdale de la place du Capitole relie l'escalier monumental qui permet d'accéder à la place, la statue centrale de Marc Aurèle et l'entrée du Capitole. Le Capitole est mis en évidence par l'axe de symétrie qui le relie à la ville tout en soulignant son rôle essentiel par sa position en fin de perspective. En revanche, différents éléments font dévier le piéton de cet axe de symétrie dès qu'il atteint la place :

- les quatre angles de la place sont ouverts.
- la porte principale du Capitole se trouve au centre de sa façade mais pour y accéder il faut monter par des escaliers qui prennent naissance aux angles de la façade
- le centre de la place est occupé par la statue de Marc Aurèle.
- le pavement de la place génère à partir de la statue un rayonnement centrifuge qui attire le piéton vers les bords de l'espace.

Ainsi, l'architecture de cette place exprime la suprématie de l'ordre généré par le Capitole sur le parcours humain individuel. Les deux schémas ci-dessous montrent le plan de la place du Capitole et le dessin raffiné de son pavement



(Plans : von Meiss 1993).

L'espace public est fondamentalement un des lieux qui nourrit l'univers familier d'un être. Des enquêtes menées dans divers pays ont montré que la zone de vie d'une personne s'agrandit lorsque son niveau socio-professionnel s'accroît. Un cadre d'entreprise ou un professeur d'université vit son environnement géographique d'une manière plus large qu'un simple employé ou une personne âgée sans ressources (Gillon 2002). On voit donc qu'il est spécialement important de valoriser l'espace public de proximité pour toutes les personnes dont le territoire familier est réduit : personnes âgées, enfants, personnes à mobilité réduite, immigrés appartenant à un couche sociale peu élevée, ... S'attacher à rendre des espaces publics porteurs de sens pour les habitants du quartier est donc un enjeu important d'une politique d'équité sociale respectueuse de tous.

Avec la disparition de la structure urbaine traditionnelle, le paysage a perdu son sens d'espace communautaire. Augustin Berque nous en fait part à sa manière : *« l'architecture moderne a déchiqueté les formes symboliques de la concitoyenneté, que la ville traditionnelle faisait aller ensemble : fin de l'alignement et fin de la continuité du bâti, donc fin de la rue ; fin de l'harmonie des hauteurs et fin des gabarits, donc fin des toits de la ville ; fin de la modulation concertée des façades et fin de la parenté des matériaux, donc fin de l'ambiance communautaire ; et pour tout dire, fin de la condition terrestre : grâce au verre et à la structure portante, nous voici planant dans l'Air et la Lumière. »* (Berque 2000) Les deux photos ci-dessous opposent deux manières de bâtir : la ville traditionnelle, créatrice d'un sens commun, et la ville moderne, où l'individu a tant de mal à définir le sens de sa vie et sa place dans l'univers.



Le sens communautaire de la ville traditionnelle
(Photos : S.Reiter).



L'individualisme de la ville moderne

La transformation des lieux collectifs en ville, symboles du sens d'habiter-ensemble, en espaces de flux, symboles de la circulation automobile et de l'individualisation, est caractéristique de l'espace-temps de nos urbanisations contemporaines où la vitesse est survalorisée. Si nous désirons retrouver un équilibre entre espace et temps, il nous faut ralentir...

Il est toutefois important de noter que la signification d'un espace public ne doit pas être pensée comme un message que l'espace veut transmettre mais plutôt comme un ensemble, toujours intersubjectif, de lectures qui peuvent être produites par cet espace dans un contexte culturel précis. Le sens n'est ni une caractéristique totalement objectivable des choses ni pure subjectivité. La signification naît d'une circulation entre l'esprit et la matière et de leur rencontre contextualisée. Ainsi, les

lieux sont toujours actuels, même s'ils portent l'héritage du passé, puisque c'est uniquement dans le moment présent que nous pouvons y lire un sens. Il n'y a de sens que dans l'évolution permanente de ce sens.

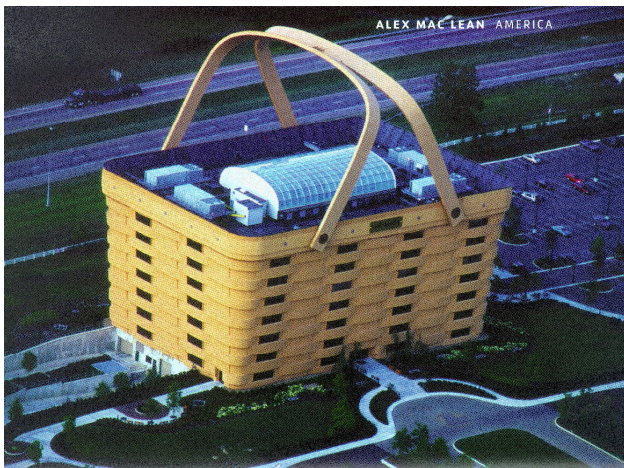
L'architecture et l'urbanisme doivent laisser la signification des lieux se présenter en elle-même. Comme le dit Aldo van Eyck, « *définir PAR la forme une signification latente au lieu de la laisser endormie DANS la forme, c'est trahir l'art, faire violence à la signification, empêcher qu'elle ne repose ni ne dure. C'est tuer la signification et bloquer la sensibilité... Il n'y a poésie que si reste ouvert l'espace d'une polysémie latente et indéfinie* » (Van Eyck 1972).



Pavement de la place Saint-Lambert à Liège (Gillon 2002)

Le non sens de beaucoup de nos espaces contemporains ne provient pas tant d'un manque de signifié mais au contraire d'une détermination trop précise du sens, de son enfermement dans un signe, ce qui correspond à une dévalorisation équivalente à celle du passage de la parole humaine au langage des machines. Ainsi, le problème contemporain du non sens de nos espaces édifiés n'est pas que l'architecture supprime toute connexion à un sens mais plutôt que notre monde est saturé d'un sens unique, qui s'impose donc de manière totalitaire : la croissance économique et technologique d'une civilisation basée sur la consommation matérielle.

La photo ci-dessous montre l'exemple d'un bâtiment qui devient signe pour affirmer son rôle actuel dans notre société de consommation, oubliant qu'un des rôles fondamentaux de l'architecture est de générer du sens.



Bâtiment-objet (Photo : Mutations- Actar 2000).

Réintroduire le sens en architecture, c'est d'abord être conscient de notre responsabilité en tant que bâtisseurs face à la société et à la Terre. Dans un monde où le progrès de la rationalité technique semble ne pas avoir de limites, il est temps de se reposer des questions d'ordre éthique ou spirituel. La logique économique et technologique actuelle a survalorisé l'importance de « l'image » et d'une soi-disant « objectivité scientifique », au détriment du sens et de l'éthique. La véritable quête du sens consiste à refuser de se laisser prendre aux apparences des images et de l'objectivité scientifique qui se limitent au seul monde visible et rationnel, à chercher au-delà de leur concrétude, une réalité toujours inaccessible, un sens qui s'ouvre à tous les possibles, une compréhension qui mène vers un ailleurs, une conscience de l'Autre.

Aujourd'hui, l'architecture a un devoir de résistance contre la dictature de l'image qui est omniprésente. Mais elle a aussi une mission d'éveil de la conscience humaine. Elle devrait nous aider à trouver une nouvelle spiritualité, afin de proposer une alternative aux discours religieux actuels, lesquels sont de plus en plus monolithiques, voire intégristes. L'architecture sert à faire évoluer l'humanité, à la confronter à ses racines profondes tout en lui ouvrant de nouveaux horizons.

L'architecture peut révéler un sens déjà présent dans un contexte précis. Par exemple, lorsque le sens de l'architecture se tisse par sa participation à la tradition locale, il s'agit d'un sens qui se dévoile, un sens construit avec les autres. Il y a aussi un sens qui naît de la création d'une ouverture vers l'absolu, l'universel, le « tout autre », l'Autre, le divin,... Le sens de la conception architecturale et urbaine oscille ainsi entre dévoilement et création. A nos yeux, le développement durable de notre espace habité passe par la conception de lieux unifiant ces deux manières de générer du sens. Ainsi, les concepteurs de projets urbains devraient toujours rendre leurs projets signifiants grâce à une cohérence entre dévoilement et création, le choix d'un risque pris *avec l'autre* pour générer un espace *ouvert à l'Autre*. Ainsi, toute architecture signifiante est à la fois locale et universelle. Elle vise toujours à élever la conscience de l'humanité sur Terre.

Un lieu public idéal est celui dont rêvait Antoine de Saint-Exupéry, «*où chaque pas à un sens* ». Dans un cours intitulé *What the City should be*, donné en 1974, Kahn disait que la ville devrait être telle qu'un petit garçon puisse ressentir, en marchant dans les rues, ce qu'il voudra être un jour (Kahn 1996). L'essence singulière qui fait l'unité, l'individualité d'un espace public a un caractère affectif parce que nous la saisissons non pas par une réflexion abstraite mais bien par notre expérience physique. Le sens d'un espace provient toujours de l'expérience indissociable de sentir, éprouver et comprendre.



Les quais de la Seine à Paris. (Photo : S.Reiter).

L'esthétique n'est pas seulement la mise en valeur d'une image individuelle. Au sens étymologique, l'esthétique a un rapport avec le sens. L'émerveillement face à la beauté nous fait pénétrer dans le monde subtil des valeurs et des significations. Rendre un espace esthétique, c'est donc aussi le rendre signifiant.

Je tiens à mettre à l'honneur la recherche de la beauté. Rappelons une célèbre phrase de Le Corbusier qui montre bien à quel point beauté et architecture sont indissociables : « *On met en œuvre de la pierre, du bois, du ciment ; on en fait des maisons, des palais ; c'est de la construction. L'ingéniosité travaille. Mais tout à coup vous me prenez au cœur, vous me faites du bien, je suis heureux, je dis : c'est beau. Voilà l'architecture.* »

Mais que signifie la beauté architecturale ? Une réponse nous est donnée par Saint-Augustin : « *La beauté est l'éclat de la vérité* » (Saint-Augustin 1997). Ainsi, la beauté est une expression visible de la signification, une manifestation tangible du sens : elle unit l'étant à l'être, l'existence à l'essence, le particulier à l'universel. L'esthétique architecturale serait donc l'expression spatiale de l'être de l'habiter. Pour Louis I. Kahn, « *La beauté est un sens de l'harmonie totale, qui engendre l'émerveillement ; la révélation en découle.* » (Kahn 1996) La recherche d'une communion avec la beauté ouvre une porte vers la connaissance et le respect. Enfin, écoutons un poète en parler : « *Contempler, c'est communier, c'est faire advenir. La beauté, n'est pas cette forme seulement extérieure, fixée une fois pour toutes, qu'on peut à sa guise poser sur une étagère comme une statuette. La vraie beauté est élan même vers la beauté, fontaine à la fois visible et invisible, qui jaillit à chaque instant depuis la profondeur des êtres en présence. Puisque la beauté est rencontre, toujours inattendue, toujours inespérée, seul le regard attentif peut lui conférer étonnement, émerveillement, émotion, jamais identiques.* » (Cheng 2002)



Pavillon de L. Mies van der Rohe. (Photo : S.Reiter).

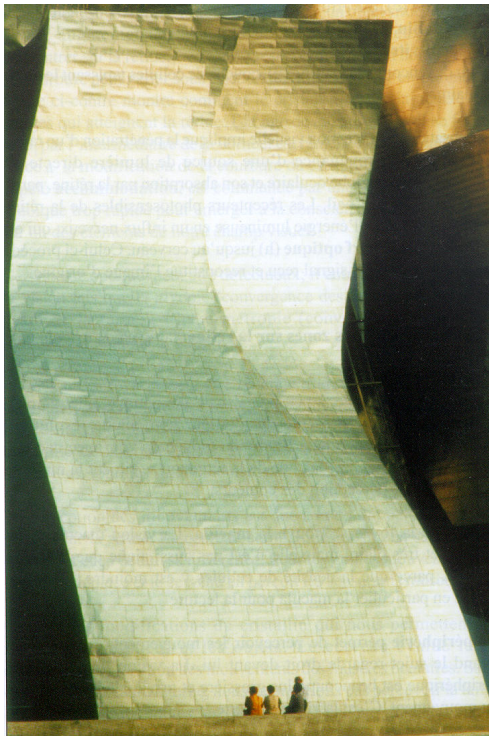
Ouvrir un espace public à des potentialités d'interprétations signifiantes, c'est aussi valoriser sa capacité à susciter des émotions et à enrichir notre imaginaire. Le grand poète Hölderlin écrivait que « *c'est poétiquement que l'homme habite* ». Nul mieux que Marcel Proust n'a décrit la connexion profonde qui existe entre la signification d'un lieu (qui prend déjà naissance dans son nom) et l'imaginaire : « *Le nom de Parme, une des villes où je désirais le plus aller depuis que j'avais lu La Chartreuse, m'apparaissant compact, lisse, mauve et doux, si on me parlait d'une maison quelconque de Parme dans laquelle je serais reçu, on me causait le*

plaisir de penser que j'habiterais une demeure lisse, compacte, mauve et douce, qui n'avait de rapport avec les demeures d'aucune ville d'Italie, puisque je l'imaginai seulement à partir de cette syllabe lourde du nom de Parme, où ne circule aucun air, et de tout ce que je lui avais fait absorber de douceur stendhalienne et du reflet des violettes. » (Proust 1954). Parme est évidemment un personnage imaginaire pour Proust. Mais en fait tout lieu véritable devrait être porteur d'imaginaire. Le philosophe Jean Ladrière renchérit sur ce sujet en disant que les villes «*qui ne se laissent pas reconstruire dans l'imaginaire sont des villes inhabitables* » (Ladrière 1973).

Citons quelques éléments susceptibles d'accroître les dimensions émotionnelles et symboliques de tout lieu public :

- tous les éléments particuliers ou symboliques tels que des fontaines, kiosques, statues ou œuvres d'art qui constituent des points d'appel chargés d'émotions.
- la mise en évidence du microclimat du lieu ainsi que de la végétation qui rappellent le rythme cyclique des saisons.
- la mise en lumière nocturne des lieux extérieurs collectifs et des bâtiments importants. Toute place devrait être aussi attrayante en soirée qu'en journée.
- ...

Les éléments naturels (le rayonnement solaire, le vent, les cours d'eau, le relief,...) renvoient symboliquement aux quatre éléments : le feu, l'air, l'eau, la terre. Ces quatre éléments font partie des plus grands symboles religieux et participent donc largement au processus de symbolisation des lieux de par leurs références cosmologiques et archétypales. Ainsi, le microclimat d'un lieu est un « bien-commun » dont la valeur est non seulement économique, écologique et sociale mais épouse également des préoccupations anthropologiques et existentielles, grâce à son potentiel symbolique.



Musée Guggenheim à Bilbao (Photo : S.Reiter).

A une époque où le discours scientifique et technocratique domine de manière écrasante, l'architecture a un rôle à jouer, grâce à sa capacité à toucher l'imaginaire, pour aider la société à sortir du dogmatisme scientifique et des langages univoques.

Jung nous explique que l'être humain a un besoin impérieux de symboles et d'archétypes: seul le symbole permet d'atteindre l'inconscient ; c'est pourquoi l'individuation ne pourra jamais se passer de symboles. On peut affirmer que quelque chose est un symbole lorsque, par son être même, il est le signe d'autre chose. Mais le symbole n'est pas un signe conventionnel car c'est en affirmant son sens premier, c'est-à-dire en étant intégralement et naturellement elle-même, qu'une chose peut renvoyer à un sens second ou figuré. Par exemple, le vent peut évoquer, par ses caractéristiques d'invisibilité et de mouvement permanent, la subtilité de l'esprit ou l'évolution incessante de toute vie. L'étant d'une chose doit donc exprimer son être pour renvoyer à une dimension encore plus profonde et plus universelle.

Le symbole est d'une part l'expression primitive de l'inconscient et d'autre part l'idée qui correspond à la plus haute réalité pressentie par la conscience. Selon Mircea Eliade, « *le symbole révèle certains aspects de la réalité - les plus profonds - qui défient tout moyen de connaissance* » et pour Ricoeur, « *le symbole signifie le lien entre l'Être de l'homme et l'Être total.* » En ce sens, le symbole est la coïncidence d'un fragment du monde avec l'univers lui-même ou, dans un sens plus mystique, la révélation du divin à travers un être particulier. C'est que toute chose est interreliée dans l'univers et que chaque étant peut donc traduire en symboles un aspect de l'univers et ouvrir sur la transcendance.

La spiritualité, cette quête éternelle du sens consiste à jeter des ponts sur le gouffre du non-sens vers un Autre qui dépasse notre entendement mais nous appelle à créer à partir du lieu de notre manque à être. Le sens ne peut donc pas être réduit uniquement à son caractère imaginaire. Au contraire, un lieu signifiant déloge le sujet de l'enfermement dans l'imaginaire comme de son enfermement dans le matérialisme pour recréer un dialogue riche et puissant entre matière et conscience. Conscientiser la matière et matérialiser la conscience, tel est aussi l'enjeu de l'aventure spirituelle de l'humanité, aujourd'hui comme hier.



Square du Petit Sablon (Photo : S.Reiter).

Beaucoup de personnes croient que des développements techniques résoudront les problèmes que la technologie actuelle pose à l'humanité. L'illusion est grande. Aux problèmes du progrès technologique, il faut proposer d'abord des solutions de progrès humain. Ainsi, à la crise de la croissance (de l'ordre de la quantité), on devrait répondre par le développement (de l'ordre de la qualité). Le but ultime du développement de l'humanité consiste à offrir à tous les êtres humains la possibilité de vivre en communion avec l'univers.

L'hégémonie des sciences et de la technologie nous a fait perdre une part significative de notre ouverture au monde symbolique. Cependant, Jung nous montre que ce soi-disant progrès scientifique n'est qu'un leurre puisque l'homme moderne est toujours en grande partie gouverné par son inconscient. « *Dans la mesure où la distinction entre le sujet et l'objet n'est pas consciente, il règne une unité inconsciente. L'inconscient en effet est projeté dans l'objet, et l'objet introjecté dans le sujet, c'est-à-dire rendu psychologique. Alors les plantes et les animaux se comportent comme des humains, et les humains sont à la fois eux-mêmes et des animaux, et tout est animé par des esprits et des dieux. L'homme civilisé se croit naturellement bien au-dessus de tout cela. Mais à la place, il est bien souvent identifié toute sa vie à ses parents ; il est identique à ses affects et à ses préjugés et il taxe effrontément les autres de ce qu'il ne veut pas voir en lui-même. En fait, il possède encore un reste d'inconscience primitive, c'est-à-dire d'absence de différenciation entre le sujet et l'objet. A cause de cette inconscience, il est influencé sans réserve par des humains, des objets et des circonstances innombrables ; son esprit est rempli d'éléments parasites presque au même degré que celui du primitif, et c'est pourquoi il a tout autant besoin de magie. Il n'utilise plus les sachets de médecine, les amulettes et les sacrifices mais les sédatifs, le « progrès », le culte de la volonté et ainsi de suite.* » (Jung 1994)



L'emprise de la technologie en urbanisme et en architecture. (Photos : S.Reiter).

Augustin Berque rejoint Jung pour dire que la modernité, bien que niant les symboles, ne cesse de produire de nouveaux appareils symboliques, dont la seule spécificité est d'être fonctionnels plutôt que cosmogoniques (Berque 1996). Ainsi, la publicité est un exemple type d'outil contemporain produisant en permanence un langage symbolique mais dont le but est de nous faire consommer davantage plutôt que de nous relier à notre âme et à l'univers.

Comme le fait très bien remarquer le philosophe Jean Proulx, « *placer son centre dans l'avoir, c'est s'engager dans les processus d'objectivation, c'est réduire son être profond à l'état d'objet. La société dite d'abondance et de consommation, fondée sur la propriété privée, la course au profit, la concurrence, la publicité, la mode et le crédit, est à proprement parler une civilisation de l'avoir, dont les symboles par excellence sont, au plan de la nation, celui du P.N.B., et au plan de l'individu, celui du niveau de vie. L'un des grands déséquilibres de cette civilisation réside dans son inversion de l'être et de l'avoir, ou plutôt, dans sa dégradation de l'être en avoir, de l'épanouissement en croissance, du bonheur en consommation, de la qualité de la vie en niveau de vie et du "mieux" en "plus".* » (Proulx 1974). Face à la tyrannie d'une civilisation de la consommation, l'architecture se doit de montrer que l'activité humaine peut être régie par d'autres valeurs.



La publicité et l'automobile : deux symboles de notre société de consommation. (Photo : S.Reiter)

Qui ne rêve pas d'habiter un lieu qui, par sa présence même, rassemble le ciel et la terre, souligne les quatre orientations, resymbolise la nature et nous laisse entrevoir le récit de la création du monde ? C'est pourtant là que se trouve le fondement même de l'acte de bâtir.

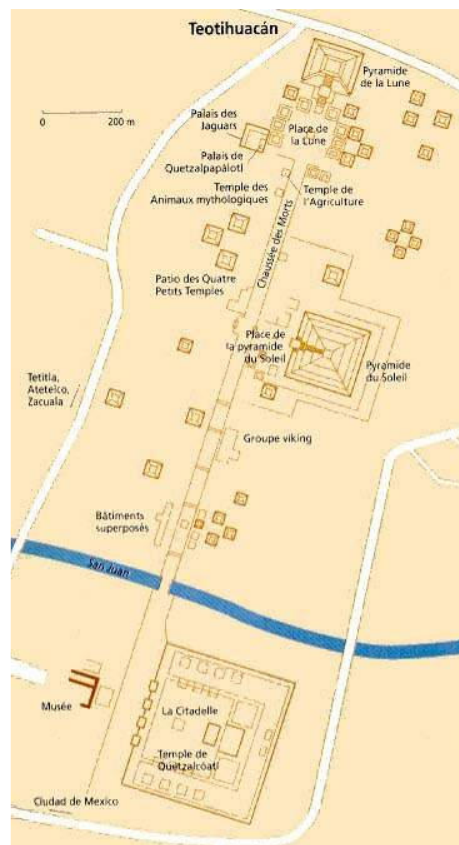


La place Navona à Rome (Photo : S.Reiter).

La forme métamytique présente au sein des textes instaurateurs de la théorie d'urbanisme vient nous rappeler la gravité de l'acte d'édification ancestralement accompli sous la double tutelle des dieux et de la communauté sociale. (Choay 1980)

L'urbanité naît aussi de la capacité du citoyen de se reconnaître symboliquement dans sa ville. « *La plupart des civilisations passées ont vu s'édifier des villes à l'image de leur cosmologie. L'aménagement de l'espace, sa symbolique et ses usages, étaient largement déterminés par le sacré. La mythologie plus que l'économie ou la politique nous renseigne sur le pourquoi de la ville et de ses rapports à la campagne.* » (Paquot 1990)

Ci-dessous, une photo et un plan des ruines de la ville Teotihuacán, au Mexique, dont le nom signifie « *lieu où les dieux sont nés* ». Le site est organisé autour d'une longue allée, qui relie le temple du Serpent à plumes (qui deviendra Quetzacoatl pour les Toltèques) à la pyramide de la Lune, en longeant la pyramide du Soleil. La photo est prise depuis la pyramide de la Lune.



Les ruines de Teotihuacan. (Photo : S.Reiter).

Nous rejoignons ainsi la vision d'Heidegger : « *Le rapport de l'homme à des lieux et, par des lieux, à des espaces réside dans l'habitation. La relation de l'homme et de l'espace n'est rien d'autre que l'habitation pensée dans son être.(...) Le lieu fait entrer dans une place la simplicité de la terre et du ciel, des divins et des mortels, en même temps qu'il aménage cette place en espaces.* » (Heidegger 1958)

La technologie réduit trop souvent le sens de la technique à sa seule fonctionnalité. C'est avec humour et poésie qu'Antoine de Saint-Exupéry nous décrit cette problématique de la perte de sens de la technologie moderne (de Saint-Exupéry 1946) : « *C'était un marchand de pilules perfectionnées qui apaisent la soif. On en avale une par semaine et l'on n'éprouve plus le besoin de boire.*

- *Pourquoi vends-tu ça ? dit le Petit Prince.*
- *C'est une grosse économie de temps, dit le marchand. Les experts ont fait des calculs. On épargne cinquante-trois minutes par semaine.*
- *Et que fait-on de ces cinquante-trois minutes ?*
- *On en fait ce que l'on veut...*

Moi, se dit le Petit Prince, si j'avais cinquante-trois minutes à dépenser, je marcherais tout doucement vers une fontaine... »

Prenons l'exemple du traitement de l'eau en milieu urbain. Assurément, il faut s'occuper de la gestion et de la qualité de l'eau, comme de la propriété et du partage des eaux, car l'eau est un bien précieux pour les collectivités humaines. Mais la symbolique de l'eau nous renvoie aussi à «l'être» de l'eau. C'est pourquoi, une étude de l'eau par ses aspects politique, économique ou technique ne devrait jamais négliger l'importance également fondamentale de sa dimension symbolique. Ainsi, dans la gestion et l'aménagement des eaux, il faut rendre l'eau visible et accessible par des fontaines, des rivières, des canalisations à ciel ouvert,... avec le souci de préserver leur capacité à devenir des eaux signifiantes car la fonction symbolique est nécessaire à tout être humain, y compris et peut-être surtout à l'habitant des grandes villes...



La symbolique de l'eau (Photo de gauche : V. Mahaut ; photo de droite : S.Reiter).

Donc, si un même choix technique peut être traduit de différentes manières dont l'une d'elle permet une appropriation symbolique, c'est cette solution signifiante qui devrait toujours être choisie.

Un bel exemple est l'aménagement d'un bassin d'orage à Matrigues sur un espace qui était devenu un large parking sauvage. Les aménagements ont été conçus pour lutter contre le ruissellement des eaux de pluie et pour favoriser l'infiltration des eaux dans le sous-sol. Un grand espace creusé et couvert de gazon sert à la fois de bassin d'orage de 4000 m³ et d'aire de loisirs. Le creux de cette terrasse engazonnée est franchissable par deux passerelles de bois légèrement surélevées. La digue de fermeture de ce bassin d'orage propose une promenade plantée sur laquelle on trouve quelques bâtiments d'intérêt collectif (restaurants, commerces). L'espace engazonné se remplit d'eau les jours d'orage, période pendant laquelle cet espace serait de toute façon peu utilisé. En revanche, la pelouse est sèche et accessible pendant les jours ensoleillés. Par conséquent, les deux usages de la

pelouse se complètent tout au long de l'année. Et si la pelouse reste humide plusieurs heures ou même quelques jours après de fortes averses, les passerelles en bois permettent aux piétons de traverser cet espace et de rejoindre les commerces sans être mouillés. (Mahaut 2005)



Aménagement d'un bassin d'orage à Matrigues (Mahaut 2005).

Cet exemple montre qu'il est possible de profiter d'une contrainte technique pour générer du sens dans les lieux collectifs. Dans ce projet, l'usage du sol est diversifié en fonction des circonstances météorologiques, rappelant ainsi à l'être humain que la Terre ne lui appartient pas et qu'il doit respecter les cycles naturels. Ainsi, cet espace collectif de qualité accomplit une réunification de la culture et de la nature en accueillant les êtres humains tout en respectant les cycles naturels.

Il ne s'agit évidemment pas de rejeter la technologie et le monde de la matérialité mais bien de les réintroduire dans une hiérarchie où l'avoir et la technique sont au service de l'être et du sens. Il faut donc opérer une révolution de l'ordre de l'éthique et de la symbolique pour replacer la technique à sa juste place.

« La technique est initialement un savoir-faire pratique ; cela va du travail de l'artisan à la fabrication d'objets qui prolongent la main de l'homme, augmentant ses capacités. Or, la technique contemporaine manifeste par rapport aux techniques pré-industrielles une rupture quantitative et qualitative. » (Ansay & Schoonbrodt 1989).

La photo ci-dessous montre comment Gaudi utilise chaque élément technique (bouche de ventilation, cage d'ascenseur,...) pour créer une architecture ouverte à des interprétations multiples.



La casa Mila à Barcelone (Photo : S.Reiter).

Signalons aussi qu'utiliser un matériau selon ses caractéristiques propres permet de revenir à des solutions plus simples pour instaurer une cohérence entre les dimensions symbolique et technique, une continuité entre la technologie et sa signification.

Nous avons la certitude que la question du développement durable de l'humanité que nous sommes en train de questionner est un pas vers une transformation plus profonde : c'est vers une transmutation de l'être humain et de sa relation au monde que se porteront les recherches de demain. Ainsi, le développement durable serait une marche, un palier entre croissance et transmutation.

1.4.3 La naturalité

Enfin, la cohérence d'un lieu dépend de sa naturalité. On est toujours lié à la nature, pris dans un ordre naturel dont on fait partie, par la force de la vie, par la réalité de notre corps. C'est dans ce lien premier, indestructible, que l'on peut trouver le fondement éthique de notre rapport à la nature.

Le mot 'nature' provient du latin *natura*, dérivé de *natus*, né, participe passé du verbe *nasci*, naître. *Natura* signifie « l'action de faire naître » et « le fait de naître ». Dans la philosophie grecque antique, la nature est considérée comme une puissance en genèse dont l'homme participe : elle ne relève pas du fini et ne peut être comprise dans le domaine des choses extérieures à l'homme. Dans sa « Physique », Aristote définit la spécificité des êtres naturels comme possédant en eux-mêmes le principe de leur devenir, de leur mouvement et de leur repos.



La naturalité. (Photo de gauche : S. Reiter ; photo de droite : B. Deprez).

Actuellement, la question de la naturalité des espaces publics est surtout prise en compte dans le sens d'une prise de conscience écologique, qui est bien sûr indispensable. Cependant, la qualité de naturalité d'un espace public urbain ne se limite pas à son point de vue écologique. Nous définissons la naturalité d'un lieu comme la capacité d'émergence et d'intégration des différentes échelles de son être. Elle correspond à la définition de la totalité donnée par Jean Ladrière : « *Le tout n'est pas une addition de parties mais il est manifestation progressive de soi* ». (Ladrière 1973) En ce sens, la naturalité est l'expression dynamique de la cohérence d'un espace. La naturalité nous relie à l'essence de la chose dans l'infinité des perspectives qu'elle autorise.

La physique contemporaine, et notamment les structures dissipatives d'Ilya Prigogine, montre qu'une cohérence dynamique peut apparaître loin des états

d'équilibre. Ces phénomènes rythmiques, dans un mouvement temporel, ont selon Prigogine un rôle constructif. La stabilité ne naît plus de certitudes immobiles mais est créée à partir de probabilités dynamiques.

Tout être naturel, à commencer par les êtres humains, possède une capacité d'auto-évolution, appelée aussi processus d'individuation. Pour Jung, « *le fond de l'âme est nature et la nature est vie créatrice. La nature, il est vrai, abat ce qu'elle a construit, mais c'est pour le reconstruire.* » La découverte la plus originale de l'œuvre de Jung est sans doute l'existence dans l'inconscient humain d'un dynamisme de transformation. Les archétypes ou organisateurs inconscients correspondent au niveau psychique au code génétique sur le plan physique et constituent des facteurs d'auto-guérison, des forces de transformation présentes dans l'inconscient visant à nous faire advenir à nous-mêmes. Ce processus d'individuation est une quête intérieure qui revêt un aspect religieux, au sens étymologique du terme : religere, être relié à nous-mêmes.

Il importe de respecter l'être essentiel de chaque chose. Mais cette essence est aussi pure potentialité, non encore réalisée. L'être essentiel est bien le visage authentique d'un être, mais non matérialisé. Révéler la naturalité d'une chose, c'est donc faire émerger son être à travers la matière.

Partant de l'interrogation : « *Que veut être un bâtiment ?* », Louis I. Kahn formule une réponse déjà implicitement contenue dans l'affirmation : « *Une rose veut être une rose* ». En d'autres termes, il affirme que toute chose doit exprimer sa naturalité propre. Concevoir un espace en respectant sa naturalité, c'est révéler ce qu'est une place, ce qu'est une rue, ce qu'est un jardin. Ainsi, ce que l'architecture exprime n'est pas distinct de ce qui la constitue.



Square du Petit Sablon à Bruxelles (Photos : S.Reiter).

Cette reconnaissance de la naturalité d'un lieu peut nous guider dans le choix d'un espace public. Considérons l'influence de l'organisation spatiale sur la naturalité d'une place. Soit, une place bordée de bâtiments continus : le style et le matériau des façades et même la forme de l'espace central peuvent être changés sans modifier la nature même de place. Par contre, en alignant les maisons en deux rangées face à face, un lieu fondamentalement différent en résulte et en les dispersant de manière aléatoire on supprime l'impression de lieu. En effet, « *chaque forme contient des champs de force cachés* » (von Meiss 1993). Ainsi,

pour choisir une forme architecturale adaptée à la nature d'un lieu, il faut tenir compte de leurs propriétés intrinsèques respectives.



Place du Plebiscite à Naples (Photo : S.Reiter).

Il nous faut reconnecter les dimensions physiques, relationnelles et signifiantes de toute chose. Chaque échelle de l'être peut exister ou ne pas exister à ces trois niveaux de son incarnation. Par exemple, l'échelle de la concitoyenneté peut exister physiquement par l'inscription spatiale d'une continuité de constructions et l'implantation d'espaces de rassemblement. Mais l'échelle de la coexistence n'est pas réellement réalisée dans son être si ces espaces ne sont pas investis et appropriés ou si ce voisinage n'est pas perçu symboliquement comme l'expression d'une concitoyenneté.

La naturalité d'un lieu naît dans la cohérence des différentes échelles de son être. Le dessin du sol des rues de Pompéi où de gros blocs de pierre créent une continuité des trottoirs et permettaient de traverser ses rues à sec les jours d'inondation tout en laissant des interstices pour le passage des charrettes est un exemple remarquable de l'intégration des différentes échelles de la conception urbaine (échelles du paysage, du quartier, de l'homme et de la technique) faisant émerger un lieu dans sa naturalité. A l'opposé, les dessins gratuits des sols de nos espaces publics contemporains ont souvent pour effet inverse de banaliser et dénaturer les spécificités d'une ville ou d'un lieu. Tout espace public se doit de rechercher cette cohérence d'échelles en son sein.



Les ruines de Pompéi (Kostof 1992).

Contrairement à la proportion, qui relève d'un système abstrait, l'échelle ramène au concret. C'est ce qu'exprime Augustin Berque : «*L'échelle, c'est en effet ce qui rapporte la grandeur de l'édifice non seulement à la taille humaine, mais aux réalités du monde sensible.* » (Berque 2000). Ainsi, la gravité, par exemple, est une réalité dont l'architecture ne peut s'abstraire.



La défense (Photo : S.Reiter).

La naturalité d'un lieu correspond à ce qu'Alberti appelle la « *convenance* ». Il entend par là une manière de traiter les formes et les espaces qui respecte la destination objective d'un lieu et l'attribution subjective de ce lieu. En effet, la naturalité d'un lieu public est indissociable du point de vue subjectif, et donc en partie symbolique, des habitants qui vont y séjourner. C'est pourquoi Augustin Berque nous incite à « *aller vers une civilisation plus humaine parce que plus naturelle, plus naturelle parce que plus cultivée* ». Ainsi, la naturalité des choses englobe la question du sens et la repositionne dans la perspective d'une émergence commune.

Mais insistons sur la dimension physique de la naturalité. L'être humain prend place comme élément du système naturel. Resituer tout projet par rapport à la corporéité humaine nous semble indispensable pour éviter de créer des villes sans échelle. De plus, l'échelle humaine permet de revenir à des solutions plus justes car plus maîtrisables et plus adaptables.



Louvain-la-Neuve (Photos : S.Reiter).

Le concept d'écosystème a modifié fondamentalement notre vision de la nature. La relation de l'homme à la nature ne peut plus être une relation de domination mais doit être reconsidérée dans un rapport de solidarité. Ainsi, humaniser la ville, c'est aussi retrouver l'échelle de la nature plutôt que celle de la machine. La nature, dans son sens biologique, nous rappelle la dimension corporelle de notre être. Introduire des éléments naturels, tels que la végétation mais aussi le soleil, le vent, la pluie, les cours d'eau, le relief, à travers les échelles d'un espace public, sert aussi à nous reconnecter à notre corps.



Les étangs d'Ixelles à Bruxelles (Photo : S.Reiter).

Le mode de vie actuel coupe l'individu de la nature. Le patrimoine naturel urbain doit être préservé pour les multiples qualités qu'il présente :

- préservation de la diversité biologique,
- régulation de l'écosystème urbain (purification de l'atmosphère, rétention des eaux,...),
- structuration du paysage urbain,
- richesse scientifique,
- support d'activités sociales et de détente,
- participation à l'équilibre psychique des individus (rôle antistress,...),
- rôle sur la santé des citoyens,
- accroissement de la valeur du patrimoine bâti,
- ...

Il est extrêmement important de valoriser la nature en ville. Il s'agit de rendre accessible des lieux naturels à un maximum de citoyens. Cependant, il faut faire attention à ce que cette mise en évidence ne mette pas en danger le faible capital de biodiversité disponible en ville. D'autre part, il est essentiel de favoriser la naturalité de ce contact entre nature et ville en favorisant la nature spontanée et en évitant les mises en scènes à caractère touristique...

Dans la conception du quartier Bo01 à Malmö, les différents jardins et espaces verts ont tous des caractéristiques différentes, notamment quant au choix des espèces animales et végétales retenues, permettant une grande biodiversité sur le quartier. De plus, des espaces protégés pour les habitats des grenouilles en hiver et la reproduction des mésanges ont même été prévus. Un système de collecte des eaux de pluie sert à alimenter les nombreuses mares créées afin d'attirer certaines espèces spécifiques d'animaux dans les différents espaces verts de ce quartier respectueux de la naturalité.



Espaces publics favorisant la biodiversité dans le quartier Bo01 à Malmö (IMBE 2005).

La végétation intervient dans l'espace public de différentes manières. Elle peut constituer un simple élément décoratif ou un élément d'amélioration de l'espace public (rue, avenue, place). Dans le cas des parcs, jardins et squares, elle devient le plus souvent l'argument central de l'aménagement. La diversité des espèces végétales utilisées et la diversité de leurs exigences offrent de multiples possibilités de combinaison et d'usage.

Diverses études menées tant en Belgique qu'à l'étranger prouvent que la végétation présente de nombreuses aménités réelles et perçues dans les espaces extérieurs urbains. Il est important de souligner l'importance de la végétation en ville pour le développement durable d'un quartier. La végétation dans les espaces publics assure de nombreux rôles quelles que soient le type de plantation (gazon, parterres, buissons, arbustes ou arbres) :

- amélioration de la biodiversité, en servant d'abri et de nourriture pour les animaux et plantes ainsi que par la création de corridors écologiques.
- amélioration de la qualité de vie, grâce à sa régulation bioclimatique, à l'embellissement des lieux qu'elle génère, au rappel du cycle des saisons et à une légère atténuation du bruit.
- amélioration du cycle de l'eau en absorbant l'eau de pluie, ce qui limite les eaux de ruissellement.
- limitation de la pollution de l'air, par son rôle de filtre à poussière et son absorption de CO₂.
- amélioration des fonctions sociales et récréatives.
- participation aux éléments structurants des projets urbains.
- ...

Les cités-jardins du Logis et de Floréal à Watermael-Boitsfort (Bruxelles) sont un superbe exemple de l'utilisation de la végétation comme outil d'urbanisme. Elles ont été construites pour y accueillir des logements sociaux dépendant de deux entités sociales différentes. Grâce à un environnement attrayant basé sur un esprit communautaire et l'usage abondant de la végétation, ces cités-jardins favorisent un sentiment d'appartenance et de compréhension réciproque entre les différents types de population qui y habitent. Signalons l'homogénéité du style architectural, l'organisation spatiale autour d'un espace central de même que l'existence de venelles piétonnes reliant les jardins publics et privés entre eux et à l'espace public de la rue. On perçoit aisément la cohérence de ce quartier qui se traduit par une grande simplicité architecturale et par la naturalité de l'aménagement des espaces extérieurs :

- de nombreux intérieurs d'îlots sont constitués d'un grand jardin public entouré de petits jardins privatifs, séparés par des haies accueillant une faune variée.
- de larges bandes plantées d'arbres et d'arbustes ainsi que des différences de niveaux créent des espaces de rencontres pour piétons, lieux de transition entre la chaussée destinée à la circulation et l'habitat privé.
- les espaces publics présentent un travail remarquable de la mise en valeur de chaque échelle dans l'ensemble. et de l'intégration des différentes fonctions et des différents types d'utilisateurs.
- ces espaces publics végétalisés sont aussi un lien entre la Forêt de Soignes et les grands parcs urbains qui bordent ces cités.



La naturalité des cités-jardins Le Logis et Floréal. (Photos : S. Reiter).

Bruxelles est une capitale particulièrement « verte » par rapport aux autres grandes villes européennes. Elle présente une surface naturelle à peu près équivalente à la surface bâtie. Le tableau ci-dessous présente la proportion de types d'espaces verts en Région de Bruxelles-Capitale, permettant d'analyser les opportunités sociales et écologiques de ces « espaces verts ». (De Schutter et al. 2000)

Types d'espaces verts présents en Région de Bruxelles-Capitale	Proportion des différentes catégories d'espaces verts (%)
Jardins privés	32 %
Forêts	20 %
Parcs et jardins publics	12 %
Grands domaines privés	10 %
Zones agricoles	7 %
Friches	7 %
Zones de récréation en plein air	4 %
Espaces verts le long des routes	3 %
Talus de chemins de fer	3 %
Cimetières	2 %

L'analyse de ce tableau nous montre qu'en Région de Bruxelles-Capitale :

- 42% des espaces verts sont interdits d'accès au public
- seulement 39% (forêt, parcs publics et friches) peuvent faire l'objet d'une planification pour le développement de la biodiversité. La partie bruxelloise de la Forêt de Soignes constitue l'essentiel des 20% de forêt.
- Les friches (7% de la surface totale des espaces verts) sont les seuls sites à présenter une nature « spontanée » dont la structure et l'aspect ne sont pas contrôlés de manière stricte par l'homme. Une attention particulière doit donc être portée vers ces lieux de régénération naturelle qui sont les plus menacés à l'heure actuelle.
- La proportion d'espaces verts privés est particulièrement grande à Bruxelles. Les grands domaines privés (comme le Domaine royal de

Laeken) et dans une moindre mesure les intérieurs d'îlots ont donc un rôle important à jouer pour conserver la biodiversité dans la ville. Cependant, leur impact social est réduit.

Les bords des voies de transport qui entrent en ville, et plus particulièrement les talus de chemin de fer, ont un intérêt stratégique pour le développement de la biodiversité parce qu'ils constituent des voies de pénétration dans la ville pour certaines espèces. Il est donc important de maintenir leur fonction de corridor écologique en assurant leur caractère végétal (mais pas forcément arboré). A Bruxelles, les talus de chemins de fer aux taillis denses et diversifiés sont les seuls véritables corridors verts qui pénètrent au cœur même du tissu urbain. En connectant les espaces verts qu'ils traversent ou qu'ils longent, ils forment de réels liens écologiques. Citons le bel exemple des prairies fleuries venues coloniser les sables calcaires qui longent les voies à Neerpede et à Haren. Par ailleurs, les friches ferroviaires, comme la gare Josaphat, sont particulièrement riches sur le plan biologique.

Les friches sont souvent d'anciennes zones agricoles laissées à l'abandon et où la nature s'est développée de manière spontanée. Ce sont donc les seuls espaces verts où la structuration du paysage est essentiellement l'œuvre de la nature. En effet, les espaces publics, les parcs et même les morceaux de forêt situés en ville sont généralement planifiés, structurés, et gérés par l'homme. De plus, les friches sont les sites naturels qui offrent la plus grande biodiversité en ville. Aujourd'hui, les friches citadines sont souvent devenues plus riches en terme de biodiversité que nos campagnes remembrées. En tant qu'environnement naturel non organisé par des êtres humains, les friches urbaines sont donc un patrimoine paysager, récréatif et écologique à conserver. Ce sont malheureusement aussi les espaces verts les plus menacés, en particulier par les pressions urbanistiques. Il est donc urgent d'établir une politique de préservation de ces friches pour l'avenir de la relation entre le citadin et la nature. (De Schutter et al. 2000)

Le site de Tour et Taxis à Bruxelles est une grande friche industrielle, située à l'emplacement d'une ancienne gare de marchandises, où la biodiversité s'est développée librement durant toutes ces années d'abandon. Des plantes et des insectes rares ou inexistant dans la Région y sont apparus. Aujourd'hui, le site va être reconverti. Le projet rassemble différents aménagements de zones vertes ainsi que la préservation de couloirs écologiques. Espérons que la vocation sociale de ces lieux n'en détruise pas sa valeur du point de vue de la biodiversité...

Enfin, signalons que puisque 42% des espaces verts bruxellois ne sont pas accessibles au public, il est indispensable que les citoyens s'investissent dans la verdurisation de leur ville. Jardins privés, balcons, terrasses sont autant de lieux laissés ouverts à l'initiative privée. Des espaces semi-publics comme certains intérieurs d'îlots sont également des lieux de convivialité et de naturalité à préserver et à enrichir...

Les intérieurs d'îlots sont, le plus souvent, composés d'un ensemble de jardins privés. Masqués par les constructions, ils ne profitent guère qu'aux « riverains ». Ils constituent cependant une précieuse réserve d'espaces verts. Cependant, ces jardins d'îlots peuvent aussi devenir en partie ou totalement publics ou semi-publics. Ainsi, la Fondation Roi Baudouin a aménagé il y a 20 ans un îlot à Schaerbeek, rue de la Poste, qui est devenu aujourd'hui un jardin ouvert au public. De même, la Région bruxelloise a protégé un îlot non encore bâti, situé rue des Mèlèzes à Ixelles. Les solutions s'improvisent selon les circonstances. Parfois, il

s'agit simplement de préserver l'îlot tel quel, contre l'ambition de certains promoteurs. Parfois, il est possible d'en faire un lieu ouvert aux habitants du quartier. Outre leur valeur écologique, les jardins d'îlot sont au coeur de la structuration urbaine de bien des quartiers bruxellois. Ils offrent un agréable cadre de vie et, parfois, des possibilités inattendues de rencontres, de jeux, de promenades ou de repos. Signalons quelques exemples d'intérieurs d'îlots convertis en espaces publics : le quartier « Les Venelles » à Woluwé Saint-Pierre, le jardin Hap à Etterbeek et le parc Tenbosch à Ixelles. Les intérieurs d'îlots peuvent donc être alternativement des passages intérieurs piétons, des jardins privés, des parcs publics, des terrasses de café ou de restaurant, des plaines de jeux, des places d'exposition temporaire extérieure,....

La configuration ouverte des îlots construits des Venelles a permis de conserver une grande superficie (4 ha) d'espaces publics protégés de la circulation automobile, regroupant diverses fonctions : plaines de jeux, pelouses arborées, potager,... Les photos ci-dessous montrent l'articulation entre les petits jardins privés, qui jouxtent les habitations, et les espaces verts collectifs en centre d'îlots.



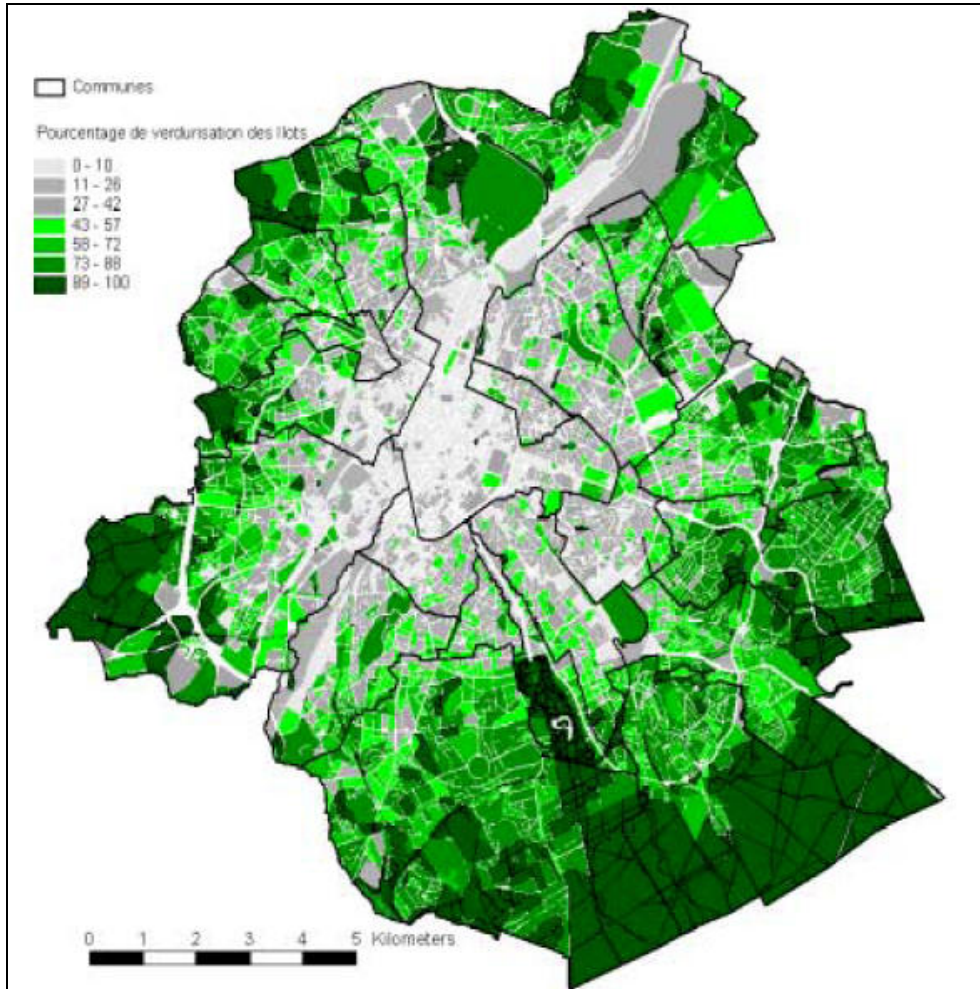
Jardins privés et publics en intérieur d'îlot dans le quartier « Les Venelles » à Bruxelles.
(Photos : S.Reiter).

Pour ce qui est de la conception de nouveaux quartiers ou villes, des typologies diverses d'îlots urbains plus ou moins ouverts peuvent être envisagés. Le but est de créer des liens entre l'intérieur de l'îlot et les rues qui l'entourent : des îlots ouverts offrent l'avantage de pouvoir créer des espaces publics au centre des îlots. De plus, ces ouvertures peuvent être placées de manière à améliorer l'accès au soleil et à la lumière naturelle dans les bâtiments, l'espace central de l'îlot et même les rues avoisinantes. Même lorsque l'intérieur d'îlot est privé ou semi-public (réservé aux habitants de l'îlot), offrir des vues sur l'intérieur de l'îlot depuis la rue permet d'améliorer la naturalité des espaces publics urbains. La pollution atmosphérique et sonore générée dans les rues se propage toutefois à l'intérieur de l'îlot d'autant plus fort que les ouvertures sont importantes. Des îlots trop ouverts génèrent également une densité urbaine faible.

Une bonne connaissance des apports de la végétation et de la biodiversité en ville nécessite de mener des analyses sous plusieurs aspects : quantité, qualité et répartition. En effet, il est assez constant dans la plupart des villes des pays de l'Europe septentrionale que les quartiers favorisés présentent une meilleure qualité d'espaces publics que les quartiers défavorisés. D'autre part, signalons que la création de boulevards urbains plantés et la formation de coulées vertes dans les villes sont des possibilités pour ménager une continuité dans les habitats naturels.

La Région de Bruxelles-Capitale présente un pourcentage d'espaces verts qui augmente du centre vers la périphérie : 10% de la superficie des îlots est verdurisée

dans le Pentagone, 30% en première couronne et 71% en seconde couronne. Le plan ci-dessous montre la répartition des espaces verts en Région de Bruxelles-Capitale (IBGE 2002). Ainsi, la préservation des zones vertes existant au centre de Bruxelles et l'aménagement de continuités vertes dans le Pentagone et en première couronne sont des nécessités pour le développement durable de Bruxelles.



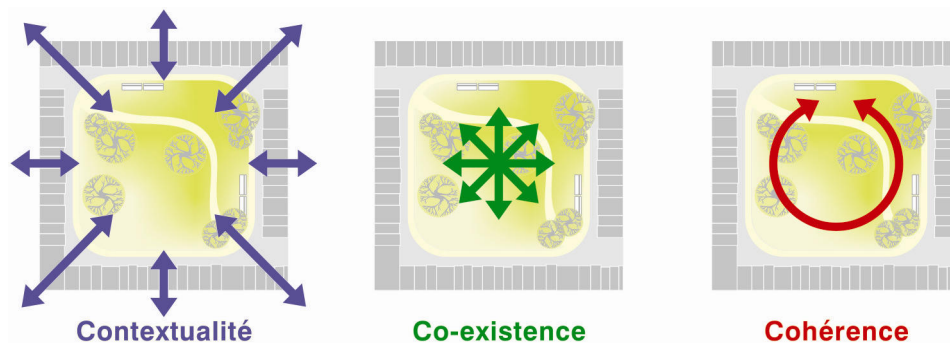
Répartition des degrés de verdisation en Région de Bruxelles-Capitale (IBGE 2002).

Notons aussi que la sensibilisation des citoyens à la nature et à la biodiversité est un investissement important qui sera très bénéfique à long terme. Nous défendons le projet d'une ville où l'élément naturel constitue une des composantes essentielles de son développement.

1.5 Stratégie de conception et de rénovation d'un espace public durable

Nous avons introduit un nouveau concept pour définir un espace public durable : le **lieu public**. Notre réflexion se propose de considérer le lieu public comme **identité à la fois singulière, collective et inscrite dans un milieu**. Ses principes fondateurs sont :

- **la contextualité** (ou inscription dans son milieu),
- **la coexistence** (ou mise en présence dense et complexe des différences),
- **la cohérence** (ou identité porteuse de sens).



Chacune de ces trois caractéristiques se développe dans un lieu public selon trois points de vue: quantitatif, qualitatif et dynamique (c'est-à-dire porteur d'une capacité d'évolution).

La contextualité

La contextualité est la mise en relation d'un espace spécifique à son milieu englobant, constitué par un contexte physique, un contexte construit et un contexte humain. **La contextualité d'un espace public, ou son inscription dans un milieu, nécessite :**

- son **intégration** grâce aux continuités, au respect de la mémoire des lieux, à la création d'espaces de transition entre les différentes échelles, ... Pour s'intégrer dans son milieu, l'espace public doit profiter des opportunités offertes par le milieu et se protéger des contraintes du milieu, aux différentes échelles de l'habiter.
- sa **participation**. Un lieu public apporte des bénéfices au milieu dans lequel il s'inscrit et le protège de toute nuisance qu'il pourrait induire, aux différentes échelles de l'habiter. Cette participation induit donc une éthique, qui vise à établir une justice intergénérationnelle en poussant les habitants à prendre conscience de leur responsabilité face au Monde et à l'Histoire. « J'ai droit à la ville » se transforme en « je suis responsable de la ville ».
- son **adaptabilité**. S'inscrire dans un milieu c'est aussi être capable d'évoluer en même temps que ce milieu.

Henri Lefèbvre, qui nous dit à quel point l'espace public est devenu un enjeu de notre société, a défini le concept de 'droit à la ville' : « *Le droit à la ville ne peut se concevoir comme un simple droit de visite ou de retour vers les villes traditionnelles. Il ne peut se formuler que comme un droit à la vie urbaine, transformée, renouvelée. Ceci suppose une nouvelle théorie intégrale de la ville et*

de la société urbaine, utilisant les ressources de la science et de l'art. » (Lefèbvre 1972). Ce « droit à la ville » est cependant complémentaire d'une responsabilité en tant qu'être humain face à notre milieu, dans ces trois composantes naturelle, construite et humaine. Cette responsabilité fait partie intégrante de notre définition du lieu public par l'intermédiaire du concept de participation nécessaire pour une bonne contextualité de l'espace public dans son milieu.

La coexistence

Par la rencontre de l'altérité, le lieu public devient le lieu privilégié de la mise en présence dense et complexe des différences, accès indispensable au vivre ensemble. **La coexistence, qui définit le lieu public comme identité collective, est créée à partir de trois qualités complémentaires :**

- le **rassemblement** qui nécessite une proximité et une certaine densité. Les espaces collectifs sont des lieux où les hommes sont réunis pour vivre ensemble.
- la **diversité** : variété de lieux, mixité des fonctions, hétérogénéité du bâti, simultanéité ou succession des activités,... La multiplicité sous toutes ses formes est nécessaire.
- l'**ouverture**, comme disponibilité à la transformation et à l'appropriation, tolérance de l'autre, libre accès, possibilité de laisser advenir... La complexité, l'hétérogénéité, les paradoxes, les incertitudes, les ambiguïtés sont des caractéristiques qui ouvrent à la liberté, à la possibilité de choisir et d'agir. L'ouverture est indispensable pour assurer une équité intragénérationnelle.

La cohérence

L'espace public ne crée un lieu public que dans la mesure où s'induit à son propos un processus d'identification collective. Un lieu public est alors perçu comme une unité spécifique, dotée d'une singularité qui la distingue de tout autre espace public.

Le lieu public est une totalité hautement complexe. Sa cohérence, qualité qui le définit comme identité singulière, se fonde sur :

- son **identité**, c'est à dire une unité ordonnée qui assemble ses parties de telle sorte que les tensions s'équilibrent (unité basée sur une hiérarchie, des limites, une orientation, une durée,...).
- son **sens**, qui révèle des valeurs, des symboles, une esthétique spécifique.
- sa **naturalité**, comme capacité d'émergence et d'intégration des différentes échelles de son être.

La stratégie globale

Selon notre définition du lieu public, pour être durable un espace public doit donc s'inscrire dans son milieu, doit offrir la possibilité de coexister dans la différence et doit créer un lieu cohérent qui implique du sens. Ces trois principes et les caractéristiques qui les définissent peuvent dès lors servir de grille d'analyse pour des espaces publics existants ou de stratégie de conception pour les projets futurs.

L'espace public contemporain est le lieu de multiples enjeux urbains: intégrer la ville diffuse à la ville dense, limiter les nuisances causées à l'environnement naturel, s'adapter aux changements de la société, densifier, assurer une mixité des usages, favoriser l'équité sociale, créer des continuités, requalifier, introduire des

éléments naturels,... Chacun de ces enjeux et bien d'autres ont pu être expliqués à travers l'élaboration de ces trois principes fondamentaux du développement durable des espaces publics.

Ainsi, tout projet urbain, même en périphérie, peut être construit à partir de trois questions fondamentales:

- quelles sont les spécificités du lieu considéré ? comment inscrire le projet dans ce contexte précis ?
- comment y créer des lieux de coexistence ?
- comment y apporter de la cohérence ?

Nous estimons que ces trois principes du développement durable des espaces publics que sont la contextualité, la coexistence et la cohérence forment la base d'une nouvelle éthique pour l'aménagement du territoire, l'urbanisme, la conception urbaine et l'architecture.



Cette définition des principes de la durabilité d'un espace public nous permet donc d'élaborer une **stratégie de conception et de rénovation d'un espace public durable**.

Pour être durable, tout espace public doit **créer un lieu public**, c.à.d.

- **S'INSCRIRE DANS SON MILIEU**, ce qui nécessite de
 - **S'intégrer.**
 - **Participer.**
 - **S'adapter.**
- **CREER DES COEXISTENCES** qui rendent disponible des potentialités pour vivre ensemble, par trois types d'actions :
 - **Rassembler.**
 - **Offrir de la diversité.**
 - **Ouvrir à l'altérité.**
- **CREER UN LIEU COHERENT**, par l'intermédiaire des trois concepts suivants :
 - **Révéler une identité.**
 - **Donner sens.**
 - **Favoriser la naturalité.**

La création d'un lieu public réside dans l'équilibre entre ces neuf principes de conception, qui s'affirment en se limitant et en se complétant l'un l'autre.

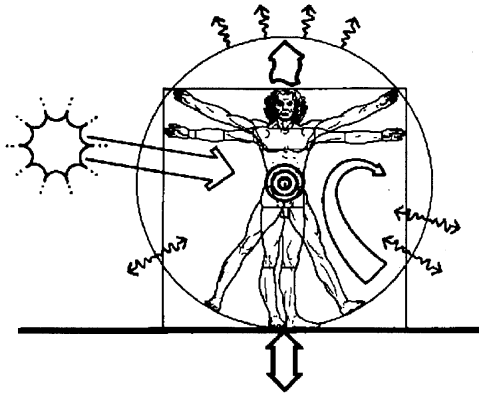
2. Elaboration d'une nouvelle méthode d'évaluation du confort à l'extérieur

«Les climats, les saisons, les sons, les couleurs, l'obscurité, la lumière, les éléments, les aliments, le bruit, le silence, le mouvement, le repos, tout agit sur notre mécanique, et sur notre âme.» Jean-Jacques Rousseau.

Cette seconde partie aborde l'étude du confort des piétons dans les espaces publics. Cette analyse est basée sur une approche innovante du confort à l'extérieur qui consiste à regrouper les points de vue physiologiques et psychologiques. Dans un premier temps, nous expliquons l'importance de l'adaptation en milieu extérieur et nous étudions les différents critères qualitatifs des espaces publics qui participent à donner aux piétons une sensation de confort. Ensuite, nous donnons les limites purement physiologiques du confort des personnes à l'extérieur en fonction des différents types de confort (thermique, au vent, respiratoire, acoustique, visuel et face aux intempéries). La conclusion de ce chapitre résume notre méthode d'évaluation du confort à l'extérieur.

2.1 Confort des piétons

L'homme est au centre de l'interaction entre une ville et son environnement. Etudier les ambiances urbaines a notamment pour but de répondre aux exigences de confort des piétons à l'extérieur des bâtiments.



(CEE 1992b)

Comment ne pas remarquer que les premiers mots échangés par les gens, qu'ils se connaissent ou non, ont très souvent trait au temps qu'il fait! C'est une expérience universelle de trouver que certains jours les conditions atmosphériques stimulent et vivifient nos activités alors qu'à d'autres moments elles limitent notre énergie physique et mentale. Le mode d'utilisation d'un espace public dépend en partie des propriétés physiques microclimatiques qui peuvent accroître, limiter, modifier ou diriger son usage. Une étude réalisée en Norvège a montré que la période de confort pendant laquelle les norvégiens sortent beaucoup à l'extérieur peut être prolongée de six semaines, au printemps et en automne, par une conception microclimatique urbaine appropriée (Culjat & Erskine 1998).

Une expérience spécialement intéressante est celle que Nikolopoulou a réalisé sur 1431 personnes. Elle porte sur la question de savoir si les conditions de confort thermique affectent l'utilisation d'un espace par ses usagers. Cette étude réalisée sur des places publiques en Angleterre prouve que l'utilisation des espaces urbains varie en fonction des conditions climatiques (Nikolopoulou et al. 1998, 2001). Cette étude a démontré que les conditions de confort affectent l'utilisation de l'espace extérieur urbain par les individus. Les réponses des personnes au microclimat sont souvent inconscientes mais le nombre d'utilisateurs de l'espace public dépend des conditions microclimatiques. Ainsi, limiter l'inconfort des piétons à l'extérieur est un des éléments essentiels pour tenter d'augmenter l'occupation des places urbaines et donc de motiver leur appropriation par les habitants.

Par l'adoption de stratégies de conception adaptées, le climat urbain peut effectivement être optimisé. Ainsi, par exemple, dans une région froide, une combinaison particulière de vent et de température de l'air ou de l'obstruction du rayonnement solaire peut décourager des personnes de rester à l'extérieur alors qu'une place exposée au soleil mais à l'abri du vent encourage les activités extérieures. Lorsque la texture urbaine est existante, des altérations sont possibles pour améliorer le microclimat à l'échelle de l'îlot. Les propriétaires de commerces sont en général les premiers à comprendre l'intérêt d'un microclimat agréable pour favoriser l'utilisation de l'espace public.

La qualité d'ambiance d'un lieu se traduit pour l'occupant en termes de sensations de confort. Cette influence positive du confort dans les espaces publics commence à être reconnue dans certaines villes ; citons deux exemples : Barcelone où la priorité donnée à l'aménagement des places est un choix politique qui a permis une revalorisation de la ville au niveau international et San Francisco où une législation impose aux nouveaux bâtiments qu'ils soient construits de telle manière qu'ils ne créent pas d'ombres gênantes pour l'espace public et que le vent soit limité à 5m/s au niveau du sol, pendant 90% des heures du jour, dans les zones extérieures publiques de détente (Bosselmann & al. 1988).

En outre, le contrôle des sources d'inconfort à l'extérieur favorise la marche, le vélo et les moyens de transport en commun. Ainsi, une politique de valorisation de modes de transport plus écologiques que la voiture passe par la requalification de l'espace public pour le piéton et le cycliste, ce qui implique d'étudier la problématique du confort dans les espaces extérieurs.

Créer des ambiances urbaines de qualité assurant le confort des citoyens est donc un des enjeux fondamentaux du développement durable des villes.



Photo : K. De Myttenaere

Merleau-Ponty, dans la *Phénoménologie de la perception*, entend faire apparaître dans toute son ampleur cette vérité : « *le monde est non pas ce que je pense, mais ce que je vis* ». Merleau-Ponty montre que le monde et la conscience, le dehors et le dedans, sont interdépendants l'un de l'autre. Le corps apparaît alors comme la matrice de l'existence. Dès l'instant où le corps n'est plus posé comme le réceptacle passif des actions d'un monde des choses sur une conscience se possédant elle-même, il joue le rôle médiateur par excellence de ma présence au monde. En fait, c'est par mon être corporel que je me découvre dans la dimension ontologique qui est la mienne: celle d'un « être-au-monde ».

Notre quotidien se déroule dans un monde de choses et d'événements. Du fait que nous cohabitons avec ces choses bien avant d'adopter avec elles une position analytique, l'expérience naturelle n'est ni objective ni subjective : elle ignore toute différenciation entre corps et conscience (Norberg-Schulz, 1997). Le corps se définit alors comme « *l'axe de notre insertion dans le monde* » (Le Goff 1994) et le confort comme une recherche d'harmonie entre l'homme et son environnement.

Vouloir intégrer la complexité du vécu humain dans l'étude du confort extérieur, c'est tenir compte de tous les éléments qui vont influencer l'expérience humaine à travers sa sensibilité (liée aux sens) et sa conscience (qui donne sens) qu'ils soient mesurables ou non. La quantification des paramètres qui influencent le confort des piétons ne peut pas s'opérer aisément à cause de leur nature, leur nombre et leur interdépendance. Cela ne signifie toutefois pas que les paramètres essentiels du confort ne peuvent pas être étudiés, ni que leur influence est accessoire. C'est ici que l'architecte et l'urbaniste doivent utiliser leur capacité à analyser le vécu quotidien d'un espace urbain et à intégrer celui-ci dans leur processus créatif.

En pratique, à côté de l'approche physiologique, il y a de nombreux facteurs psychologiques qui doivent être pris en considération dans la définition du confort. Malgré la difficulté due à la subjectivité du point de vue psychologique, il est possible de considérer certains critères de conception qui auraient un impact considérable sur le confort.

Ainsi, ces dernières années, l'importance de l'adaptation dans le processus du confort a largement été identifiée (Baker 2000, de Dear et al. 1997, Nikolopoulou & Steemers 2003). Le terme adaptation est souvent défini comme une diminution graduelle de la réponse de l'organisme à une stimulation environnementale répétée. L'opportunité d'adaptation est la liberté réelle et perçue de pouvoir modifier son environnement local ou son propre ressenti. Cette opportunité d'adaptation diminue les exigences de confort du sujet même lorsque l'action possible n'est en fait pas réalisée. Il y a donc un aspect psychologique et pas seulement physique dans ce comportement d'adaptation. Dans nos vies confortables, il est facile d'oublier le rôle vital de l'adaptation pour la survie d'une espèce. Cependant, le succès de cette capacité d'adaptation est remarquable.

Nous commencerons par étudier la problématique du confort à l'extérieur par son aspect qualitatif. Ensuite, nous approfondirons les limites quantitatives du confort extérieur. Nous analyserons successivement les critères physiologiques du confort thermique, du confort par rapport au vent, du confort respiratoire, du confort acoustique, du confort visuel et du confort face aux intempéries.

2.1.1 Les différences entre le confort intérieur et extérieur

La majorité des études réalisées sur le confort portent uniquement sur les conditions intérieures et les quelques recherches qui ont été abordées pour étendre ces critères de confort intérieur à l'extérieur sont des approches purement physiologiques et stationnaires.

Il est toutefois évident qu'on ne peut pas aborder de manière identique le confort à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Tout d'abord, les deux paramètres climatiques principaux à l'extérieur sont le vent et le rayonnement solaire direct, tous deux exclus des études réalisées à l'intérieur. La pluie et la neige peuvent également influencer fortement le confort à l'extérieur alors qu'elles n'entrent pas en compte pour l'étude du confort intérieur des bâtiments. En outre, les échanges de rayonnement de grande longueur d'onde sont également très différents dans l'un et l'autre contexte. Les surfaces intérieures d'un bâtiment ont peu de différences de température et donc échangent peu de rayonnement entre elles. Par contre, à l'extérieur, les surfaces (ombragées, ensoleillées, voûte céleste,...) offrent des températures variées. Les échanges de rayonnement de grande longueur d'onde ne peuvent donc pas être négligés à l'extérieur.

D'autre part, les personnes situées à l'extérieur portent généralement des habits différents en fonction de la saison, adaptés aux conditions climatiques du moment. D'autres éléments, tels que le type d'activité effectuée, peuvent aussi marquer une différence physiologique importante du point de vue du confort.

Notons également que les conditions climatiques sont généralement très stables à l'intérieur des bâtiments alors qu'elles sont naturellement nettement plus variables dans les espaces ouverts. Par exemple, les températures de surface du mobilier vont peu changer pendant une journée alors que la température des surfaces extérieures exposées au rayonnement solaire direct peut varier très rapidement. Comme les gens passent la plupart de leur temps à l'intérieur dans un environnement aux conditions climatiques stables, les modèles stationnaires sont utiles pour analyser le confort thermique à l'intérieur. En revanche, ces modèles ont tendance à surestimer l'inconfort à l'extérieur. La différence est encore plus grande pour les conditions extérieures froides que pour les climats chauds. En effet, pour une personne sortant d'une pièce confortable vers un espace extérieur froid en hiver, l'état stable ne sera atteint qu'après plusieurs heures, alors que dans un environnement extérieur chaud, il sera atteint en moins de 30 minutes (Höppe 2002).

Enfin, le comportement subjectif des personnes face aux conditions environnantes est très différent à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. A partir d'interviews de piétons à l'extérieur, différentes études ont montré qu'à l'extérieur les personnes acceptent des conditions climatiques nettement plus éloignées de l'équilibre qu'à l'intérieur (Nikolopoulou et al. 1998, 2001, Höppe 2002). Les citoyens acceptent globalement les conditions climatiques extérieures auxquelles ils sont acclimatés et adaptent donc leurs exigences de confort en fonction de la saison et des moyennes climatiques habituelles de leur lieu de résidence. L'habitude d'un certain type de climat crée non seulement une adaptation vestimentaire ou un choix d'activité mais augmente également la tolérance corporelle à un certain type de conditions considérées ailleurs comme inconfortables. En outre, l'importance des facteurs psychologiques sur le confort des personnes à l'extérieur est fondamentale car l'adaptation psychologique est beaucoup plus marquée à l'extérieur qu'à l'intérieur. Ce facteur d'adaptation est pourtant généralement oublié.

2.1.2 Le processus d'adaptation



(Photos : S.Reiter).

La définition de la qualité des espaces publics du point de vue de la perception et du comportement des citoyens part de l'hypothèse que la qualité des espaces publics ne peut jamais induire les comportements espérés par un lien direct de cause à effet mais qu'en revanche elle peut favoriser ou limiter certains comportements et certains types d'usage et ainsi aider les citoyens à s'approprier l'espace public urbain, grâce à la prise en compte des paramètres humains de perception et de participation.

La physique quantique nous a permis de comprendre qu'il n'est pas possible de représenter le réel mais seulement la réalité, c'est-à-dire une certaine relation au réel. La sensation de confort est l'expression du bien-être d'un individu en rapport avec son environnement. L'espace perçu est toujours une réduction de l'espace réel. Le système de perception humaine fait intervenir des filtres lors de l'analyse d'un espace: seuls certains éléments sont perçus, dont quelques-uns sont enregistrés en mémoire. Ainsi, l'homme ne garde qu'une image simplifiée et subjective du réel. Pour un même environnement urbain, le confort peut varier selon les personnes en fonction d'une combinaison de facteurs physiques, physiologiques, psychologiques, sociologiques et culturels (CERMA 2002).

Dans le contexte du confort thermique, le bilan thermique est une des composantes qui influence la sensation de confort thermique d'une personne à l'extérieur. Il a toutefois été prouvé que cette approche n'est absolument pas suffisante pour définir des critères de confort thermique extérieur (Nikolopoulou et al. 2001, Höppe 2002). L'adaptation psychologique semble être un élément tout aussi essentiel (Nikolopoulou & Steemers 2000). Dès lors les critères influençant l'adaptabilité psychologique des personnes doivent être intégrés dans toute méthode d'évaluation du confort thermique à l'extérieur.

L'adaptation thermique peut couvrir tous les processus que les personnes peuvent initier pour faire coïncider leurs besoins thermiques avec les conditions environnementales. Analysons ce processus d'adaptation en profondeur. L'adaptation thermique humaine se fait à l'aide de trois processus distincts: l'adaptation comportementale (ou physique), l'adaptation physiologique et l'adaptation psychologique (Baker 2000, de Dear et al. 1997, Nikolopoulou et al. 2001). Ces trois catégories d'adaptation sont définies ci-dessous.

L'adaptation comportementale comprend toutes les modifications qu'une personne peut réaliser consciemment ou inconsciemment pour modifier son équilibre thermique corporel. On peut citer un ajustement personnel (habillement, activité, posture, nourriture, boisson, changement de localisation), un ajustement environnemental (modification de l'environnement lui-même comme par exemple l'ouverture d'un parasol) et l'ajustement culturel (codes vestimentaires, activités dictées par la société comme faire la sieste). L'effet des adaptations physiques peut en général être évalué quantitativement.

L'adaptation physiologique est une réponse physiologique du corps qui tend à diminuer le stress lié à une exposition inconfortable. Dans le contexte de l'environnement thermique, il s'agit d'acclimatation physiologique. Ce genre de mécanismes est crucial dans des environnements extrêmes ou des situations d'inconfort prolongé amenant à des risques importants pour la santé. Dans le cadre de notre étude sur le confort des piétons dans les espaces publics, je n'ai pas trouvé de résultats de recherche permettant d'évaluer cette adaptation physiologique. Des études devraient être réalisées dans ce domaine pour pouvoir en tirer des conclusions précises.

L'adaptation psychologique est une modification de la perception d'une information sensorielle. Ce type d'adaptation est souvent relié à la notion d'« habitude » en psychophysique qui correspond à la diminution de l'intensité de la sensation liée à l'exposition répétée au même stress environnemental. Cependant, l'adaptation psychologique couvre un domaine nettement plus large que la prise en compte de l'expérience par rapport à des expositions passées : elle dépend de tous les aspects subjectifs et contextuels de notre perception. L'adaptation psychologique est très difficile à quantifier mais nous essayerons dans la suite de ce chapitre d'en définir les critères qualitatifs.

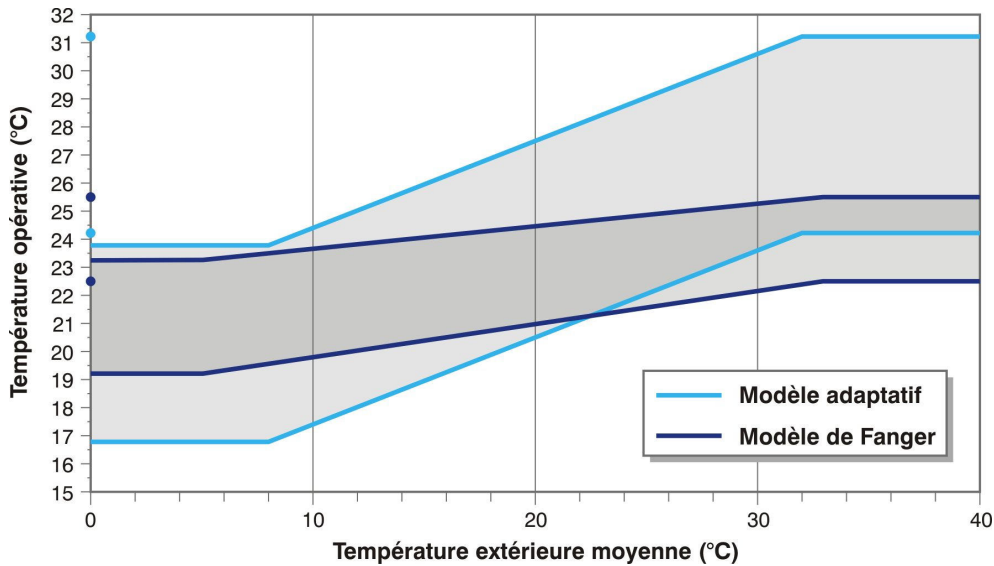
Du point de vue du confort thermique intérieur, des études récentes montrent que le confort des personnes à l'intérieur des bâtiments ventilés naturellement suit un modèle « adaptatif » pour lequel la zone de confort est plus large que celle habituellement utilisée dans la norme ISO 7730. Ainsi, en tenant compte de l'adaptation des occupants, la température opérative idéale dans les bâtiments ventilés naturellement ne suit pas le modèle de Fanger mais dépend plutôt de la température extérieure (de Dear & Brager 2002) :

$$Top = 17.8 + 0.31 Te$$

où Top est la température opérative idéale et Te la température extérieure en moyenne mensuelle. La bande de confort acceptable a été déterminée à partir de la méthode classique PMV-PPD de Fanger. L'intervalle d'acceptation pour 90% des occupants est de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. Il s'élève à $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ pour assurer le confort de 80% des personnes.

Ce modèle adaptatif a été introduit dans la norme ASHRAE 55 pour les bâtiments ventilés naturellement dans lesquels les occupants ont un contrôle réel sur l'ouverture des fenêtres. Cette nouvelle norme a été établie à partir de l'analyse de 21000 données compilées à partir de l'étude de 160 bâtiments localisés sur quatre continents et appartenant à des climats très variés. Comme le montre la figure ci-dessous, les prédictions de la norme ISO 7730 sont différentes de celles du modèle adaptatif, même si on tient compte des variations saisonnières de l'habillement (1clo en hiver et 0.5 clo en été). Cette différence provient de ce que les occupants des bâtiments ventilés naturellement ont souvent un certain contrôle sur leur environnement et qu'ils ont davantage l'habitude de se trouver dans des espaces dont l'ambiance thermique fluctue, ce qui augmente leur capacité d'adaptation.

D'autre part, la température de confort du modèle adaptatif est intimement liée à la température extérieure, ce qui explique l'importance de l'histoire thermique des occupants et de leurs attentes dans le processus d'adaptation.



Comparaison du modèle de confort adaptatif de Dear et Brager (2002) et celui de Fanger repris dans la norme ISO 7730 pour une activité de bureau (1.2 met) et un confort de 80% des personnes.

La zone de confort dépend à la fois de la température atteinte et des possibilités d'adaptation offertes aux personnes. Dans les situations où les personnes ne peuvent adapter ni leur vêtement, ni leur activité, ni leurs conditions environnementales, la zone de confort est très étroite autour de la température optimale de confort. Mais pour des situations où des opportunités d'adaptation réelles existent, la largeur de la zone s'agrandit fortement (Nicol & Humphreys 2002). Il est évident que si le comportement d'adaptation des personnes varie si fortement entre un bâtiment ventilé naturellement et un bâtiment refroidi par air conditionné, la différence est également importante entre l'extérieur et l'intérieur d'un édifice...

Dans le contexte du confort acoustique, il est reconnu depuis longtemps qu'on ne peut pas traiter le bruit de manière purement objective, parce que s'il est facile de mesurer la puissance physique des sons, il est plus difficile d'évaluer la façon dont ils sont perçus. Il est évident que des limites quantitatives sont indispensables pour déterminer les niveaux sonores à ne pas dépasser mais il est également intéressant d'étudier les phénomènes qualitatifs qui interviennent dans notre appréciation d'une ambiance sonore.

Une étude réalisée sur 9200 personnes interviewées sur une année complète (entre l'été 2001 et le printemps 2002) sur 14 espaces publics répartis en Europe, suggère que l'évaluation subjective du niveau sonore correspond généralement bien avec le niveau L_{eq} moyen mesuré, tant que le niveau sonore reste en-dessous d'environ 73 dBA. Cependant, des différences considérables sont obtenues entre l'évaluation subjective du niveau sonore et l'appréciation du confort acoustique dans chacun de ces espaces, ce qui nécessite donc une étude des paramètres qui influencent l'évaluation positive du confort acoustique au-delà du niveau sonore présent dans le lieu (Yang & Kang 2005).

Enfin du point de vue visuel, l'œil est un organe sensoriel qui possède des capacités d'adaptation extraordinaire. Le contrôle de la quantité de lumière admise sur la rétine est possible grâce à la pupille, ce diaphragme d'ouverture variable. La réaction de l'œil face au flux de lumière se manifeste également par une lente adaptation de la sensibilité de la rétine. Notre vision est également influencée par des facteurs d'ordre psychologique.

La grande majorité des auteurs affirment l'importance du point de vue subjectif dans l'évaluation du confort mais cet aspect reste en général une simple remarque à côté de longs développements pour l'établissement de méthodes quantitatives (tableaux, graphes ou formules). Récemment, certains auteurs se sont centrés sur la partie psychologique du confort mais ces auteurs mettent de côté son évaluation quantitative. **Notre approche consiste à affirmer qu'il est important d'évaluer quantitativement l'équilibre physiologique des piétons et qualitativement les critères qui influencent leur adaptabilité psychologique et de tirer les conclusions les plus judicieuses de cet ensemble de paramètres pour améliorer les possibilités de confort dans les espaces publics extérieurs.**

2.2 Critères qualitatifs du confort extérieur

L'adaptation psychologique est un des éléments essentiels de la définition du confort à l'extérieur. Les facteurs qui influencent cette adaptation psychologique ne sont toutefois pas totalement subjectifs. **Nous avons relevé dix paramètres qui influencent de manière significative l'évaluation qualitative du confort des personnes à l'extérieur, au-delà des composantes culturelles et individuelles.** Il s'agit de:

- l'identification d'une ambiance,
- la relation au contexte,
- la continuité des conditions environnementales,
- la diversité des ambiances,
- la perception du contrôle possible,
- la capacité de s'adapter,
- la naturalité du lieu,
- la variabilité des conditions environnementales,
- le caractère signifiant du lieu,
- la globalité de la sensation de confort.



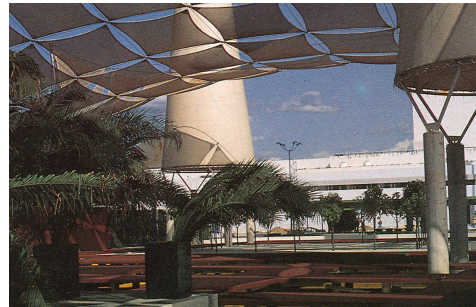
(Photo : S.Reiter).

2.2.1 L'identification d'une ambiance

Il est important de concevoir et d'aménager des espaces publics clairement identifiables et offrant des **ambiances spécifiques**. En fait, tout élément climatique, visuel ou acoustique qui permet au piéton de se situer est généralement perçu comme un facteur positif.

La perception d'un espace reste relativement constante, tant que l'ambiance générale n'est pas modifiée. Donnons un exemple visuel, si le niveau d'éclairément passe objectivement du simple au décuple et plus mais de manière homogène, l'espace perçu reste le même. Cela est vrai au-delà des possibilités d'adaptation de l'œil. A l'intérieur de certaines limites, l'espace sera plus clair ou plus sombre mais pas fondamentalement différent. La perception d'un même espace et donc le confort ressenti changera, en revanche, lorsqu'on fera varier la luminance ou l'éclairément de certaines surfaces tout en conservant les autres. Dans le langage courant, on parle de « changement d'ambiance », ce qui dénote bien une mutation qualitative dans laquelle la quantité de lumière n'est qu'un facteur parmi d'autres. Les couleurs et les matériaux choisis ont également une influence considérable sur notre perception visuelle de l'espace et l'identification d'une ambiance visuelle spécifique.

L'identification d'une ambiance est un critère qui favorise le confort des personnes. Les espaces publics de l'expo'92 à Séville ont fait l'objet de recherches scientifiques pour favoriser le confort des piétons. Les stratégies de contrôle du microclimat utilisées comprennent: la végétation, l'ombrage, la ventilation naturelle, l'évaporation de l'eau, l'inertie thermique du sol et des aménagements paysagers. La réussite des technologies microclimatiques de l'expo de Séville provient également de la spécificité des solutions proposées sur chaque lieu de rencontre, permettant aux piétons de reconnaître facilement les espaces qu'ils traversent. Ainsi, par exemple, l'avenue de l'eau est une allée qui assure le confort thermique des visiteurs par la présence de bassins et de fontaines associés avec une couverture végétale alors que l'avenue de l'Europe est marquée par la présence de toiles tendues créant un ombrage léger et de tours à vent qui apportent de l'air frais.



Espaces publics de l'expo '92 à Séville : avenue de l'eau et avenue de l'Europe.
(Photos : Grupo de termotecnia 1994)

Une étude de terrain réalisée sur trois villes espagnoles (Carles & al. 1999) montre que la perception d'une identité acoustique améliore l'évaluation subjective du lieu. Dans une autre étude, un orchestre jouait de la musique dans un espace public pendant environ 35% du temps de l'enquête, ce qui faisait passer le niveau Leq de 59.7 à 61.1 dBA, ce qui est bien sûr négligeable. Cette étude a permis de constater que les utilisateurs de l'espace évaluaient de manière subjective le niveau sonore de l'espace comme nettement plus élevé pendant que la musique jouait mais qu'ils y associaient un niveau de confort acoustique accru (Yang & Kang 2005). Cette

étude montre donc que le fait d'identifier clairement un type de son, ici la musique, augmente la perception du niveau sonore engendré mais que par contre elle améliore la sensation de confort acoustique.

D'autre part, pour un même niveau sonore, les personnes préfèrent un lieu dont le niveau du bruit de fond est moins élevé (Yang & Kang 2005). Cela signifie qu'il est important pour les usagers d'un espace d'identifier les sons qui les entourent et de percevoir le lien entre cette ambiance sonore et le lieu traversé.

Une étude réalisée par Catherine Sémidor à Bordeaux montre qu'en l'absence de trafic automobile, les ambiances sonores semblent fortement liées aux typologies urbaines rencontrées. Ainsi, pour un tissu semi-ouvert, nous remarquons une différence de perception de l'image acoustique obtenue par les deux oreilles. L'oreille située du côté de l'espace vide reçoit en effet plus d'énergie sonore que celle qui se trouve du côté des bâtiments. Par contre, pour des rues bordées de bâtiments des deux côtés, le champ acoustique est plus diffus et les deux images sont plus proches l'une de l'autre ce qui dénote l'existence de multiples réflexions entre les façades. Cette identification sonore de la nature « ouverte » ou « fermée » du tissu urbain contribue notamment à une plus grande appréciation des qualités urbaines du site. La circulation en ville couvre malheureusement souvent ces différences sonores et cache ainsi l'influence de la morphologie urbaine sur l'identité des paysages sonores (Sémidor 2002).

D'autre part, la **cohérence** entre l'ambiance sonore et l'ambiance visuelle d'un espace est un élément important pour le confort des utilisateurs. Lorsque les sons ne sont pas appropriés au lieu dans lequel ils sont perçus, ils sont ressentis négativement. Des incohérences entre sons et images diminuent clairement les valeurs de confort, indiquant qu'il est important de conserver la singularité d'un paysage particulier (Carles & al. 1999). Notons aussi que les paysages sonores qui sont reliés aux activités exercées dans un espace public spécifique sont considérés comme favorisant le confort des personnes (Kang & al. 2004).

La photo ci-dessous donne l'exemple d'une ambiance cohérente permettant de se situer. Le carillonnement des cloches est un élément caractéristique de l'ambiance sonore du centre de Bruxelles. La présence visuelle de l'horloge et la mise en évidence de la cloche assurent une identification cohérente du lieu.



Le Mont des Arts à Bruxelles (Photo : S.Reiter).

Enfin, il est extrêmement important de créer des **repères perceptifs** (visuels, sonores,...) à travers le tissu urbain pour aider les usagers à se situer. On appelle repère perceptif un élément visuel, sonore, olfactif,... qui attire particulièrement

l'attention des visiteurs d'un espace. Les repères sont des éléments qui génèrent un contraste par rapport à leur environnement, que ce soit par leurs dimensions, leur géométrie, leur position, leur couleur, leur intensité, ... Les repères sont de véritables points de référence dans la ville.

Par exemple, la présence d'une vue spécifique, telle qu'une ouverture sur le paysage environnant, renforce la sensation de confort en participant à une définition de l'identité d'un lieu. Les vues sont généralement constituées d'une direction spécifique et d'un élément de terminaison. La direction a pour but de guider l'attention de l'observateur vers l'élément de terminaison. La direction peut être marquée par une rue droite, un alignement d'arbres, un pont, une percée dans une limite continue, ... L'élément de terminaison est le point focal vers lequel le regard est attiré. Il s'agit en général d'un monument, d'un objet attirant (œuvre d'art, fontaine,...) ou d'un morceau de paysage (naturel ou urbain) soit exceptionnel soit typique du contexte local. Les vues ont toujours été utilisées pour améliorer l'organisation urbaine et l'identification des lieux importants. Un exemple contemporain est celui de La Défense à Paris qui a été conçue pour continuer un axe historique majeur de Paris, offrant de nombreuses vues sur des courtes et des longues distances.

Les douze tours réfrigérantes de l'avenue de l'Europe à l'expo '92 à Séville sont un exemple d'éléments microclimatiques servant également de repère et de porte à l'espace public. De forme conique, ces tours de 30m de haut sont habillées d'un textile blanc réfléchissant le rayonnement solaire. Le jardin est entouré d'une enceinte de 2.5m de haut dont les 12 tours marquent les 12 portes. L'air entre au sommet, se rafraîchit par l'évaporation de l'eau brumisée à l'intérieur des tours et coule dans l'espace public dont l'air est ainsi refroidi.



Tours de refroidissement naturel à l'expo'92 de Séville.
(Photos : Grupo de termotecnia 1994)

La qualité d'un paysage sonore peut être substantiellement améliorée en incorporant des repères sonores favorables (Kang & al. 2004). Les repères sonores sont de deux types : actifs et passifs. Les "repères sonores actifs" sont liés aux sons générés par des activités dont le but est sonore, comme par exemple un petit orchestre installé dans un kiosque ou sur le coin d'une place, la cloche d'une

église,... Ce type d'éléments et d'activités sonores peut ajouter un caractère spectaculaire au paysage sonore. Il est important de fournir des lieux spécifiques pour de telles activités/occasions et de considérer l'aménagement acoustique de ces espaces. Par repère sonore passif, on parle d'éléments typiques du paysage sonore d'un espace mais dont le but premier n'est pas sonore, comme par exemple les sons de l'eau produits par une fontaine.

Il faut donc introduire une piste de recherche concernant les ambiances urbaines : essayer par la conception urbaine de conserver des ambiances visuelles, sonores et climatiques qui traduisent le vécu sensible d'un lieu et participent à la perception de leur cohérence et à la formation de repères perceptifs afin de favoriser l'identification du lieu.

2.2.2 La relation au contexte

Oseland a prouvé que le confort thermique dépend du contexte. Il a montré que, pour des mêmes conditions physiologiques, le même groupe de personnes éprouvait une sensation de confort différente dans trois contextes différents : une chambre climatique, leur lieu de travail et leur habitation, en devenant de plus en plus tolérants. Ainsi, ils acceptaient une température de confort de 3K inférieure dans leur maison que dans la chambre climatique (Oseland 1994). Il est évident que les personnes deviennent encore plus tolérantes lorsqu'elles sortent à l'extérieur.

Il y a deux grandes écoles de pensées sur le confort thermique à l'intérieur: ceux qui estiment que le confort thermique est le mieux exprimé par une ambiance neutre provenant d'un état équilibré stable et ceux qui assurent que le confort peut être atteint à l'intérieur d'une gamme de sensations thermiques. La première école défend le modèle statique, qui couvre des études aussi connues que le modèle PMV de Fanger, ASHRAE Standard 55 et International Standard 7730 (ISO). Elle utilise des études en chambre climatique pour assurer sa théorie. Ces études tiennent toutefois compte de l'adaptation comportementale liée aux vêtements et aux activités des personnes. La deuxième école, incarnée par Auliciems et Nicol, soutient la méthode adaptative (Auliciems 1989, Nicol 1993, de Dear & Brager 2002). L'approche adaptative consiste à définir la température intérieure comme plus fortement reliée à l'environnement extérieur et aux capacités de contrôle de l'occupant. Pour justifier leur point de vue, l'école adaptative réalise des expériences dans des bâtiments réels.

Une étude scientifique basée sur un très grand nombre de bâtiments dans le monde (de Dear et.al. 1997) montre que s'il y a deux méthodes de confort thermique intérieur, c'est parce qu'il y a deux contextes d'études différents. De plus, elle prouve que dans les bâtiments HVAC, le modèle de confort de Fanger (PMV) est remarquable pour prédire le confort mais que, pour les bâtiments ventilés naturellement, il est préférable d'utiliser une méthode de prévision du confort adaptative. Comme la méthode de prévision de Fanger permet d'intégrer les adaptations comportementales (habits et activités) et que les adaptations physiologiques peuvent être négligées à l'intérieur des édifices, la différence de réaction constatée au sein des deux types de bâtiments provient de l'adaptation psychologique prise en compte dans l'approche adaptative. Il est donc évident que le contexte influence fortement l'opportunité d'adaptation psychologique d'une personne.

Par ailleurs, du point de vue acoustique, Gustavino a montré que le sujet humain, contrairement à un instrument de mesure, est capable de traiter de différentes manières un même événement auditif suivant le contexte d'écoute (Gustavino 2001). On sait aussi qu'en période diurne, les niveaux sonores élevés sont généralement mieux tolérés qu'en soirée et pendant la nuit (Blasco 2001).

Puisque le confort est fortement contextuel, la solution à un problème de confort par rapport au climat d'un espace public dépend de son insertion par rapport au milieu. La résolution du problème se trouve dans l'étude des différents contextes (environnemental, construit et humain), selon la localisation, le moment de l'année, les activités prévues,...

Pour favoriser l'appropriation des espaces publics, il est indispensable de comprendre et de tenir compte des éléments fondateurs de la communauté sociale dans laquelle s'inscrit cet espace.

Un élément fondamental à prendre en compte dès le début du processus de conception d'un espace extérieur est le profil saisonnier de l'usage de cet espace urbain. Aucune décision par rapport au microclimat ne peut être prise sans tenir compte du lieu, de ses temporalités et de ses utilisations. A chaque saison correspond une appropriation différente des espaces publics. Ainsi, il est par exemple judicieux de concevoir des possibilités d'adaptation différentes selon les saisons. Les photos ci-dessous montrent la place des Sciences à Louvain-la-Neuve, à la Noël (pendant la période de blocus pour les étudiants) et au printemps.



La place des Sciences à Louvain-la-Neuve, au fil des saisons. (Photos : S.Reiter).

Il faut créer des espaces en intégrant les activités les plus probables, le temps que la majorité des gens vont y passer et le type de conditions climatiques espérées comme des entrées essentielles du problème de conception. Il est par exemple judicieux de placer des terrasses de restaurants du côté ensoleillé d'une place.



(Photo : S.Reiter).

Inversement, il est possible de susciter des activités adaptées aux caractéristiques du lieu. Si un espace public est fort bruyant, il sera vraisemblablement difficile d'y créer un espace de méditation efficace mais il pourra aisément servir de terrain pour des pistes de skateboard ou une plaine de jeux.



Square des Ursulines, à Bruxelles, en 2006. (Photos : S.Reiter).

Il est donc toujours important de réfléchir à quand et comment un espace va être utilisé par les citoyens avant de choisir quel type d'action réaliser sur l'environnement. Cette leçon fondamentale aurait d'ailleurs pu être tirée de l'architecture et de l'urbanisme climatique du passé: **aucune solution n'est valable dans toutes les situations. Chaque projet doit d'abord s'inscrire dans son contexte.**

2.2.3 La continuité des conditions environnementales

Il faut assurer une relative continuité des conditions environnementales, c'est-à-dire éviter les contrastes trop fort, spatialement et temporellement. Un changement abrupt dans l'environnement est toujours difficile à accepter.

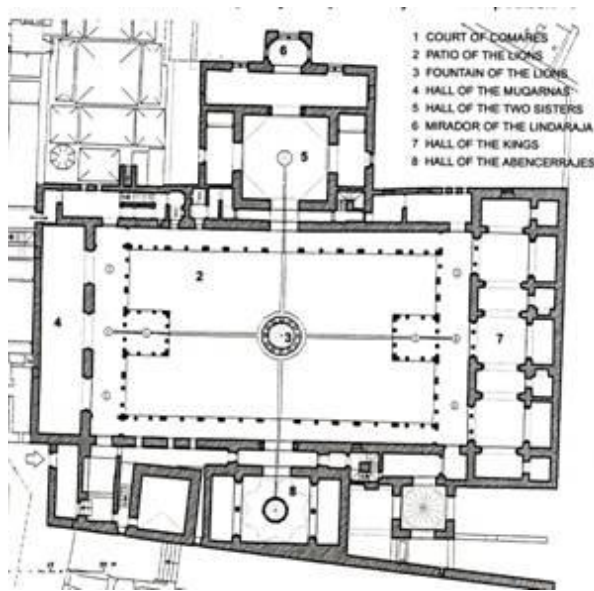
Commençons par étudier les contrastes spatiaux. Au niveau thermique, la tendance à l'équilibre des températures des parois est favorable à un accroissement du niveau de confort des occupants. La présence de deux niveaux de luminance très différents, adjacents dans le champ visuel, est une source d'inconfort et diminue l'acuité visuelle (Reiter & De Herde 2001). Au niveau acoustique, l'apparition de bruits dérangeants est moins bien tolérée dans un environnement calme qu'en présence d'un bruit de fond plus élevé (Blasco 2001). Notons enfin que l'être humain supporte nettement mieux des vitesses de vent élevées lorsque la poussée du vent se fait de manière continue et homogène alors que les variations de vitesses du vent créées par les turbulences engendrent rapidement des niveaux d'inconfort inacceptables (Melbourne & Joubert 1971, Bottema 2000).

D'autre part, du point de vue temporel, Fanger a étudié l'impact des changements de température sur le confort thermique en chambre climatique. Son étude démontre que la vitesse d'adaptation à un nouvel environnement est différente selon que le changement va dans la direction d'un environnement plus neutre ou plus extrême. Pour un changement qui s'éloigne de la condition de confort (neutralité), un long temps d'adaptation (au moins 20 minutes) est nécessaire pour arriver à une condition d'équilibre. Par contre, un changement allant vers le confort offre un degré d'acceptabilité atteint en cinq minutes. Notons en outre que le corps humain s'adapte plus facilement à un environnement trop chaud que trop froid. La sensibilité humaine est donc plus grande au froid qu'à la chaleur (Nikolopoulou & Lykoudis 2005).

De même, le phénomène d'adaptation de l'œil dépend des luminances de départ et d'arrivée et de tout changement de brillance. L'adaptation à l'obscurité prend plus de temps qu'à la lumière. L'œil nécessite environ 30 minutes pour s'adapter aux conditions extérieures d'obscurité en sortant d'une ambiance lumineuse alors qu'il ne nécessite que quelques secondes pour s'adapter à la lumière en quittant un environnement obscur (Reiter & De Herde 2001).

Ainsi, pour faire passer une personne d'un environnement confortable à un environnement plus éloigné de la neutralité, il est conseillé de créer des zones de transition pour que le passage se fasse insensiblement. Par contre, pour aller d'une zone inconfortable vers une zone plus confortable, une modification brusque semble acceptable.

Etudions le superbe exemple d'architecture bioclimatique qu'offre le patio aux lions dans le palais Nasrides de l'Alhambra de Grenade. Le patio consiste en une cour intérieure dont le centre est occupé par une fontaine à partir de laquelle des rigoles d'eau coulent vers les quatre corps du bâtiment. Ce patio est entouré d'une colonnade marquée par deux portiques.



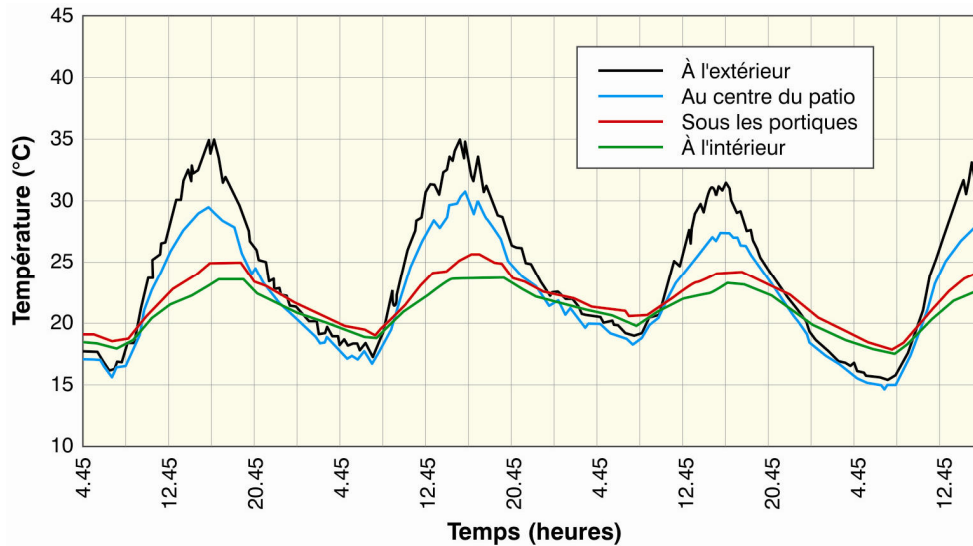
Plan du palais Nasrides à Grenade (Jimenez 2002).

Les photos ci-dessous montrent les colonnades et les portiques du patio aux lions qui servent d'espaces de transition entre l'intérieur et l'extérieur du point de vue lumineux, du point de vue de l'ouverture visuelle et du point de vue thermique.



Transitions visuelles et thermiques du patio aux lions à Grenade (Photos : S.Reiter).

Le graphe ci-dessous montre l'évolution des températures de l'air à l'extérieur du palais, dans le patio et sous les portiques (Jimenez 2002). On voit comment le confinement d'un espace associé à une fontaine et des petits canaux d'eau permet de limiter les pics de température de l'air dans le patio par rapport à l'extérieur du palais et donc de conserver une ambiance de relative fraîcheur constante au cours de la journée. De plus, les températures de l'air sous les portiques sont encore plus faibles que dans le patio. Ainsi, la colonnade qui entoure le patio crée un espace de transition thermique entre les pièces fermées du palais et le patio ouvert au ciel.

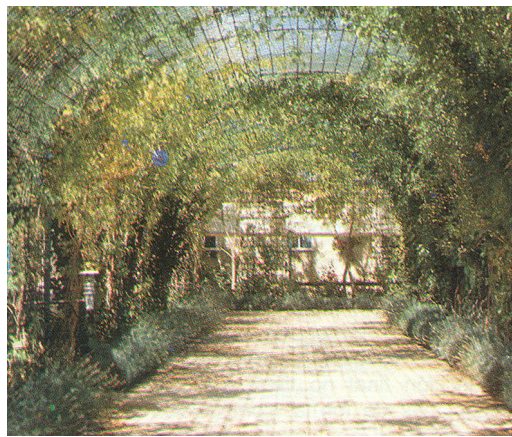


(Jimenez 2002).

Les possibilités de créer des espaces de transition sont infinies; elles dépendent du climat et de la forme du bâti.



Espace de transition à Londres
(Photo : S.Reiter)



Espace de transition à Séville
(Photo : Grupo de termotecnia 1994)

2.2.4 La diversité des ambiances

Un parcours piéton ou une place sont d'autant plus attractifs qu'ils présentent de la variété à différents niveaux. Ainsi, analyser les paysages séquentiels qui s'offrent aux piétons quand ils circulent et y introduire une dynamique et une richesse basée sur la diversité des ambiances est un atout pour attirer les piétons. Il est important de limiter le sentiment de monotonie.

Les espaces qui offrent des zones à l'ombre et au soleil sont utilisés sur une plus longue durée d'occupation que ceux qui ne présentent qu'un seul type d'ambiance (Nikolopoulou & Steemers 2000). En fonction du climat local et de la saison, quelqu'un peut préférer être assis au soleil ou à l'ombre, être frôlé par une brise ou être protégé du vent, être en contact avec le ciel ou profiter de la couverture d'une arcade. Les villes ont été et peuvent être conçues pour fournir ces choix.

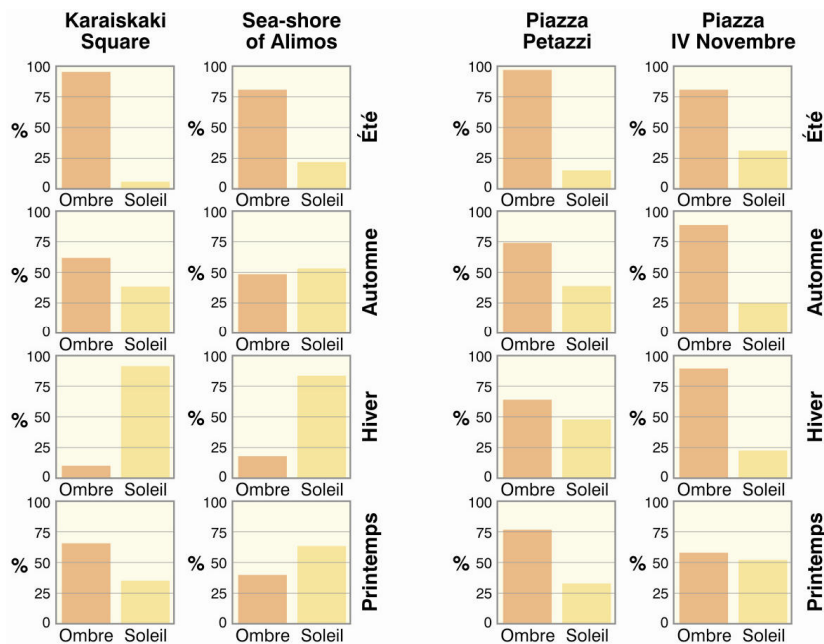
Ainsi, des lieux présentant aux utilisateurs des choix d'ambiances différentes vont créer un sentiment de confort accru. Notons que certaines zones seront évidemment préférées à certaines saisons ou moments de la journée.

La variation des zones ensoleillées et des zones d'ombre dans un espace public est une source importante de diversité et de variabilité pour cet espace. Une règle générale à appliquer dans tous les espaces publics pour assurer cette variété de conditions environnementales est la suivante : la proportion ensoleillée de l'espace ouvert doit couvrir entre 20% et 80% de la surface du site. Ce critère de diversité par rapport à l'ensoleillement est un critère qualitatif du confort qui correspond à des données quantitatives au niveau thermique (Nikolopoulou & al. 2004) et au niveau visuel (Compagnon & Goyette-Pernot 2004).



Zones ensoleillées et ombragées (Photos : S. Reiter)

Les graphes ci-dessous montrent les résultats d'interviews sur terrain concernant le confort thermique au soleil et à l'ombre à Athènes (37.5°N) et Milan (45°N).



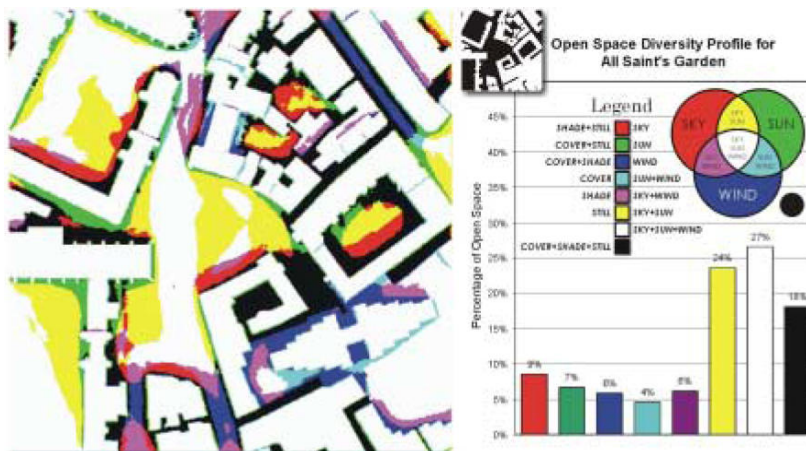
Variation saisonnière du nombre de personnes situées à l'ombre et au soleil sur deux places d'Athènes, à gauche, et deux places de Milan, à droite (Nikolopoulou & al. 2004).

On voit bien que même dans un climat chaud comme celui d’Athènes en été, 10 à 20% des personnes choisissent de s’installer au soleil. Cette conclusion souligne l’importance de la diversité des conditions environnementales pour le confort des piétons. De même, en hiver à Athènes, 10 à 20% des personnes s’installent à l’ombre alors qu’une majorité de la population recherche le soleil. Les différences de pourcentages entre les personnes qui s’asseyent à l’ombre et au soleil sont nettement moins marquées au printemps et en automne qu’en été ou en hiver. En outre, les résultats donnés pour Milan montrent des choix moins tranchés qu’à Athènes car le climat de Milan est plus tempéré. Ainsi, par exemple, selon la saison et la localisation, l’enseillement des places peut être souhaitée majoritairement, à égalité ou minoritairement par rapport à des zones d’ombre. Dans le premier cas, il est tout de même judicieux d’assurer 20% d’ombrage et dans le troisième cas d’assurer 20% d’enseillement de la place. En moyenne saison ou pour des lieux où les préférences climatiques ne semblent pas évidentes, il est bon de créer une variété plus équilibrée d’ambiances ensoleillées et ombragées.

Le confort visuel est amélioré quand le champ visuel offre suffisamment de diversité sur un plan horizontal, là où les activités humaines ont lieu. Cette importance de la variété dans le champ visuel est soutenue par plusieurs recherches (Lozano 1974, Compagnon & Goyette-Pernot 2004). Ce critère de diversité du point de vue visuel est également amélioré si la proportion ensoleillée de l’espace ouvert couvre de 20% à 80% de la surface du site (Goyette-Pernot 2004).

Il est judicieux de favoriser les conditions climatiques les plus adaptées pour chaque saison en un lieu déterminé, tout en assurant la possibilité de trouver des conditions microclimatiques différentes sur certaines zones plus réduites de l’espace public.

Steemers & al. propose d’étudier le microclimat d’un espace public à partir de cartes représentant la diversité des conditions microclimatiques présentes dans cet espace. Le but principal de ce type de carte est d’indiquer le degré relatif de diversité environnementale en fonction de la forme urbaine. Le graphique ci-dessous montre un exemple de ce type de carte de diversité environnementale pour le All Saint’s Garden à Cambridge. L’image de gauche montre la superposition des cartes de seuils de facteurs de vue du ciel, d’ombrage solaire et d’obstruction du vent. Le graphique à droite montre la distribution des différentes combinaisons environnementales présentes sur ce site (Steemers & al. 2004).



(Steemers & al. 2004).

Ce graphique de la répartition des différents profils environnementaux montre que le site dispose d’une prédominance de conditions ‘calme-enseilillé’ et ‘enseilillé-

venteux' assez bien adaptées au climat anglais tout en offrant aussi quelques lieux 'calme-ombragé'. Pour un climat tempéré, l'absence presque totale de lieux 'venteux-ombragé' dans les espaces extérieurs n'a pas grande importance (Steemers & al. 2004).

Pour affiner l'analyse, un classement de différentes combinaisons environnementales peut être produit en fonction de la zone climatique considérée à partir d'une méthodologie proposée par Brown et de Kay (Brown & de Kay 2001). Dans ce livre, un ensemble de valeurs ont été identifiées par climat et par saison. afin d'attribuer des points aux différentes combinaisons entre soleil / ombrage et calme / venteux. On peut adapter ce tableau pour ajouter l'ouverture vers le ciel ou la couverture (protection par rapport aux intempéries). Le tableau ci-dessous présente les valeurs que j'ai choisies pour la Belgique. L'échelle d'évaluation varie entre 1 pour les conditions les moins désirées en Belgique et 5 pour les conditions préférées en Belgique.

Conditions environnementales	Hiver	Printemps et automne	Été
Ombre, calme et ciel	1	2	2
Soleil, calme et couverture	5	4	2
Ombre, vent et couverture	2	1	4
Soleil, vent et couverture	4	3	3
Ombre, vent et ciel	1	1	3
Soleil, calme et ciel	4	4	1
Soleil, vent et ciel	3	3	2
Ombre, calme et couverture	3	2	3

Cependant, comme on l'a expliqué, la diversité des conditions offertes garde toute son importance. Il est peu important de vouloir définir ou de chercher à atteindre des conditions de confort physiologique optimal en milieu urbain. Par contre, l'évaluation du succès d'un environnement urbain en terme de diversité est plus pertinente. Ainsi, le but consiste à maximiser une diversité adéquate afin d'augmenter les possibilités de choix en relation avec le climat, les activités et les préférences des usagers.

Lors de la conception d'espaces urbains ouverts, il est important de se rappeler qu'il est préférable de créer une variété de conditions environnementales car c'est la façon naturelle dont les choses se présentent dans les espaces extérieurs. L'interaction entre les différents paramètres de la morphologie urbaine crée un profil de diversité unique sur chaque site. La diversité des ambiances peut être introduite par une différence d'orientation, une différence de morphologie du bâti, une différence de fermeture de l'espace ou encore la présence d'éléments d'aménagement (végétation, fontaines).

Notre objectif est donc de créer un environnement urbain riche et varié, offrant aux piétons des possibilités de choix multiples. Il est conseillé d'introduire de la diversité au niveau des ambiances proposées dans un même lieu ainsi qu'entre différents espaces de rencontre situés à proximité les uns des autres.

2.2.5 La variabilité des conditions environnementales

Les variations de climat sont non seulement souvent tolérées mais même désirées par les êtres humains. Un environnement variable est souvent préféré à un environnement statique. Le besoin de variabilité de l'environnement est spécialement nécessaire aux personnes qui passent une grande partie de leur journée à l'intérieur d'un local monotone (Baker 2001).

L'éclairage naturel est préféré à l'éclairage artificiel grâce à sa variabilité et à ses nuances. La variabilité de la lumière naturelle a un impact positif sur l'être humain. Elle nous relie au monde naturel et nous permet de nous situer spatialement et temporellement. Son caractère cyclique est un facteur important pour notre équilibre psychique (Reiter & De Herde 2001).

Les conditions confortables sont souvent regardées théoriquement comme celles où les personnes se trouvent dans un état neutre thermiquement. Cependant, la stimulation environnementale est un des buts pour lesquels les gens vont à l'extérieur (Nikolopoulou & Steemers 2003).



(Photo : S.Reiter).

Les choix des vacanciers en terme d'activités extérieures les exposent fréquemment à des niveaux d'inconfort élevés; citons par exemple bronzer sous un soleil brûlant, skier, escalader une montagne, nager. Comment concilier cette constatation avec notre définition du confort thermique? Ces environnements extrêmes nous apportent un contraste salutaire par rapport à nos environnements construits, constants et artificiels. Les êtres humains ont un réel besoin de variabilité et de stimulation environnementale (Baker 2000).

Une ville sans bruit serait une ville morte, une ville sans hommes. Le bruit est une composante inévitable de la vie. Fort heureusement, l'univers sonore d'une ville ne comprend pas que des bruits désagréables. Un grand nombre de sons servent d'horloge sociale du quotidien : par exemple, le calme des dimanches contraste avec l'agitation des jours de semaine, la présence du marché est un repère dans la vie du quartier, etc. Beaucoup d'éléments sonores sont des stimuli positifs qui introduisent de la variété dans notre environnement. Il faut s'efforcer de les préserver parce qu'ils sont indispensables à l'homme.

Notons par exemple que les sons émis par une fontaine sont attrayants pour la plupart des gens mais que si le niveau sonore reste constant en permanence, les

personnes s'en désintéressent au bout d'un petit moment. Pour que le bruit de l'eau reste attrayant, il est recommandé de faire varier le débit de l'écoulement d'eau des fontaines (Kang & al. 2004). Il est donc fortement suggéré que le taux d'écoulement des fontaines qui servent de repère ou d'agrément sonore ne soit pas constant. Ainsi, l'intérêt de la variabilité environnementale est encore une fois démontré.

En survalorisant la technologie, notre société délaisse souvent la qualité intrinsèque des variations naturelles (lumière, chaleur, niveau sonore, ...). **Il est donc indispensable de créer des opportunités d'ouverture aux changements dans nos environnements trop rigides.** Les arbres à feuilles caduques, par exemple, induisent une variabilité naturelle: en fonction de leur feuillage, ils laissent largement passer la lumière en hiver tandis qu'ils créent un ombrage bienvenu pendant l'été. La photo de droite ci-dessous montre l'exemple d'un élément d'aménagement de l'espace public amovible : il s'agit de protections solaires mobiles qui ombragent cet espace extérieur à Séville pendant les mois d'été mais qui sont retirées de l'automne au printemps pour bénéficier du rayonnement solaire quand il n'est pas trop fort.



Élément d'aménagement variant naturellement (à gauche) ou amovible (à droite).
(Photo : S. Reiter) (Littlefair et al. 2000)

Un même élément d'aménagement peut présenter des utilités diverses en fonction de la variabilité du milieu dans lequel il est plongé. Les photos ci-dessous montrent par exemple qu'un auvent peut servir d'ombrage sous le soleil en été et de protection contre la pluie en hiver. Vu les variations journalières et saisonnières des données météorologiques, il est utile de trouver des solutions qui s'adaptent à ces cycles en proposant des fonctionnalités différentes selon le moment du jour ou de l'année.



Auvent à usages multiples à Louvain-la-Neuve (Photos : S.Reiter).

D'autre part, l'occupation des espaces publics est rythmée selon de nombreux cycles : quotidien, hebdomadaire, mensuel, saisonnier, annuel, ... Ces rythmes se concrétisent généralement par une certaine polyvalence d'occupation des espaces publics. Les perceptions et usages des citoyens dépendent du caractère polyvalent des espaces publics.

Ainsi, il est essentiel de valoriser les caractéristiques de variabilité d'un espace public de manière à ce que cet espace s'adapte naturellement aux variations cycliques de ce lieu (climat, usages,...). Il y a différentes échelles temporelles et différentes échelles spatiales possibles pour créer cette variabilité.

2.2.6 La perception du contrôle environnemental possible



(Photo : S.Reiter).

La perception du contrôle environnemental possible est un des éléments les plus essentiels du confort thermique. Paciuk affirme que les stimuli désagréables sont moins irritants lorsqu'ils sont perçus par des sujets capables de les contrôler (Paciuk 1990).

L'adaptation interactive n'est pas courante dans les zones extérieures. Cependant, des éléments mobiles, tels que des parasols ou des auvents, peuvent fournir des variations spatiales et temporelles pour adapter le microclimat d'un lieu. Ces éléments offrant une opportunité de contrôle direct sur l'environnement sont généralement très appréciés des utilisateurs d'un espace.

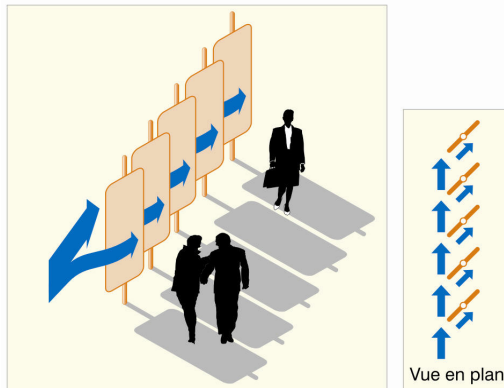
L'ensemble du mobilier urbain (bancs, abribus, poubelles, panneaux indicateurs,...) pourraient être travaillés pour être adaptables à l'occasion. De même, les surfaces ou cloisons de séparation entre différentes parties de l'espace public peuvent servir à y instaurer un certain contrôle environnemental local.

D'autre part, certains éléments d'aménagement pourraient ne fonctionner que sous l'influence humaine afin de favoriser la participation des personnes à l'ambiance urbaine. Par exemple, une fontaine ou un éclairage artificiel d'ambiance pourrait être actionné régulièrement de manière automatique, tout en offrant l'opportunité aux passants de le faire fonctionner en dehors de son horaire habituel par un appel manuel.

Les deux images ci-dessous présentent des exemples d'éléments de mobiliers urbains permettant aux usagers de l'espace de contrôler les conditions microclimatiques auxquelles ils sont soumis. En haut, un ensemble de parasols sur la place du marché à Thionville. En-dessous, des brise-vents mobiles qui peuvent être employés comme coupe-vent pour créer un barrage de l'air froid en hiver, tout en canalisant le vent en été et en offrant la possibilité de créer un ombrage adaptable.



Place du marché à Thionville



Brise-vent adaptable.

Les photos ci-dessous donnent l'exemple d'une réalisation par l'asbl Recyclart d'éléments modulaires pour la pratique du skateboard dans les espaces publics.



Éléments modulaires pour la pratique du skateboard (Photos : www.recyclart.be).

Favoriser les possibilités d'adaptation des éléments d'aménagement d'un espace public permet d'offrir aux utilisateurs de l'espace un certain contrôle qui accroît leur sensation de confort.

2.2.7 La capacité de s'adapter

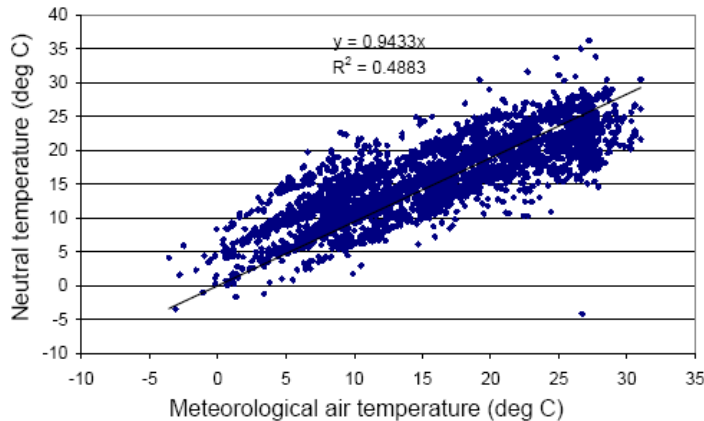
Le confort ressenti dans un espace public extérieur dépend également de la capacité (réelle ou perçue) des utilisateurs à s'adapter à leur environnement. Par capacité d'adaptation réelle, nous pouvons signaler, la possibilité de mettre un manteau quand on a froid, de prendre une boisson rafraîchissante s'il fait trop chaud, d'ouvrir un parapluie s'il pleut, ... Mais il existe aussi de nombreux éléments qui influencent la perception humaine de ses capacités d'adaptation. Nous citons l'influence des prévisions des piétons, leur motivation à se trouver dans ce lieu, une durée courte d'exposition et leur sentiment d'être en sécurité. La possibilité de se déplacer vers un autre type d'ambiance est aussi perçue comme une capacité à s'adapter à notre environnement.



(Photo : S.Reiter).

Les perceptions thermiques sont directement liées aux expériences passées et aux prévisions des utilisateurs d'un espace. La mémoire récente du sujet et les prévisions des piétons ont une double importance: elles influencent leur choix vestimentaire et elles les préparent psychologiquement. *'Je m'attends au temps qu'il fait en cet endroit et donc je m'y habitue'*. Cela correspond souvent aux réponses données dans les interviews sur le confort thermique extérieur: *'C'est OK pour cette période de l'année'* ou *'en été, il pourrait faire plus chaud!'*. (Nikolopoulou & Steemers 2000). L'expérience passée n'est pas tellement liée au site puisqu'elle dépend de l'histoire de chaque personne, mais on peut tout de même influencer l'expérience à court terme.

Dans le contexte du projet européen RUROS, les conditions de confort thermique extérieur ont été évaluées à travers des enquêtes sur terrain (près de 10 000 interviews) dans 14 centres-villes européens (Nikolopoulou & al 2004). Cette étude montre que la neutralité thermique moyenne, c'est-à-dire la sensation thermique pour laquelle les personnes ne ressentent ni le chaud ni le froid, est très proche de la température météorologique de l'air (°C), pour tous les questionnaires effectués en Europe. De manière plus précise, on relève que les variations de la température désirée en fonction de la température expérimentée restent en général dans un intervalle de -5°C à +5°C, sauf aux températures les plus basses (-5 à 10°C) où la température neutre peut aller jusqu'à 10°C au-dessus de la température réelle et aux températures les plus élevées (25 à 35 °C) où la température neutre peut varier entre -10°C et +5°C. Ce phénomène provient de l'influence de l'expérience récente de piétons et de leurs prévisions sur leur capacité à s'y adapter. Le graphe ci-dessous montre la corrélation entre la neutralité thermique et la température moyenne pour l'ensemble des 28 espaces publics européens testés.



(Nikolopoulou & al 2004).

Les expériences acoustiques antérieures jouent également un rôle dans l'évaluation qualitative d'un paysage sonore. Ainsi, les personnes qui viennent d'un environnement intérieur bruyant tendent à mieux s'adapter aux espaces publics urbains bruyants (Kang & al. 2004).

L'étude de Yang et Kang montre aussi que l'évaluation subjective du niveau sonore d'un espace pour un même niveau sonore mesuré était plus élevée dans le cas d'une place où le niveau de bruit moyen journalier est plus élevé que dans le cas d'une place habituellement plus calme, ces deux espaces étant situés dans la même ville (Yang & Kang 2005). Cet exemple montre bien l'importance des expériences passées et des ambiances habituelles dans la perception des niveaux sonores dans un espaces public extérieur.

Ainsi, du point de vue acoustique, le niveau sonore du bruit de fond est spécialement important : un bruit de fond plus faible améliore le confort acoustique des personnes dans un lieu, même pendant les heures où se bruit de fond est largement dépassé (Yang & Kang 2005).

Notons également que la durée d'exposition influence également la capacité d'adaptation des utilisateurs. L'exposition à un inconfort n'est pas vue négativement si les individus anticipent que sa durée est courte, comme sortir d'une voiture pour rejoindre un bâtiment en hiver (Nikolopoulou & Steemers 2000). C'est un phénomène similaire qui fait que les personnes qui attendent un moyen de transport en commun sont nettement plus calmes et ressentent moins l'inconfort quand elles connaissent la durée de leur attente, par exemple grâce à un affichage du nombre de minutes qui sépare une rame de métro de la suivante. Par contre, tout inconfort de longue durée est un aspect critique pour l'utilisation d'espaces urbains de récréation ou de repos car les gens modifient le temps qu'ils y passent en fonction de leurs besoins de confort.

La motivation d'une personne à être en un lieu peut aussi influencer sa capacité d'adaptation. Les personnes assises sur des places publiques, par des conditions physiologiquement inconfortables, éprouvent une satisfaction nettement plus élevée lorsqu'elles sont à un endroit de par leur propre choix que lorsqu'elles attendent quelqu'un d'autre (Nikolopoulou & Steemers 2000). De même, pour des niveaux équivalents d'inconfort, les personnes se plaignent davantage si elles sont là pour travailler ou pour promener leur chien que si elles sont là par choix personnel. (Nikolopoulou & Lykoudis 2005).

Dans les études réalisées in situ, il y a pratiquement toujours l'un ou l'autre cas de personnes qui choisissent des situations réellement inconfortables uniquement parce qu'elles retirent un bénéfice d'un autre ordre. Citons par exemple le cas de jeunes jouant au basketball à Athènes sous le soleil de midi, alors que la température extérieure était de 35.5°C. Habituellement, ces conditions thermiques représentent un cas idéal où toute activité physique est limitée à son minimum et où les zones ombragées sont recherchées. Dans ce cas, l'envie de jouer ensemble au basketball permet de dépasser une situation d'inconfort évident (Nikolopoulou & Lykoudis 2005). Dans la base de données du projet européen RUROS, au sein duquel les conditions de confort thermique extérieur ont été évaluées à travers près de 10 000 interviews dans 14 centres-villes européens, toutes les personnes qui se trouvaient dans des situations thermiquement inconfortables mais estimaient être dans une situation confortable y étaient pour une des trois motivations suivantes : pour pratiquer une activité de loisir (sports,...), pour « faire une pause » dans leur journée de travail ou d'étude ou bien pour des raisons strictement personnelles. Par contre, les personnes qui travaillent à l'extérieur et celles qui se contentent de traverser l'espace sont spécialement sensibles à un environnement inconfortable. (Nikolopoulou & Lykoudis 2005)

Le sentiment d'être en sécurité est également essentiel pour ressentir un espace extérieur comme confortable. Il est donc judicieux de tenir compte de différents éléments qui influencent cette sensation d'être en sécurité. Tout d'abord, un espace public est rassurant quand il n'est pas trop ouvert (perte de repère) ni trop étroit (sentiment d'être piégé). Le tableau ci-dessous présente le rapport entre distance et perception (Nasar & al. 1993).

Distance (m)	Perception humaine liée à cette distance
0-0.5	Odeurs et perception du rayonnement thermique
0.5-1.25	Distance maximale pour toucher quelqu'un
2.1-3.6	Distance pour converser
9	Distance maximale de contact individuel
12	Distance maximale pour percevoir les expressions d'un visage
24	Distance maximale pour reconnaître un visage
135	Distance maximale pour voir le mouvement d'un corps humain
1200	Distance maximale pour voir une silhouette humaine
4000	Distance de l'horizon pour une personne dont les yeux se trouvent à 1.65 m du sol.

Il est judicieux de choisir des dimensions spatiales qui offrent des perceptions humaines adéquates par rapport au type de lieu souhaité. Rappelons que les places médiévales en Europe ont généralement des dimensions inférieures ou égales à 60*140 mètres (Sitte 1996). Rappelons également qu'un piéton parcourt facilement la distance de 150m mais dépasse rarement un parcours de 300m sans une forte motivation.

Un bon entretien et surtout un bon éclairage des espaces publics le soir est le premier critère pour se sentir en sécurité. Le sentiment de sécurité peut être aussi favorisé en offrant la possibilité d'utiliser un chemin assez dégagé car les zones sombres ou encombrées offrent des repères pour les agresseurs éventuels. De même, le sentiment individuel de sécurité est influencé par la vue de sorties accessibles. Ces « sorties » peuvent être des voies de fuite ou des lieux où le piéton pourrait se réfugier, tels que les magasins, cafés, restaurants,... Selon des enquêtes sociales réalisées in situ, ces éléments influencent non seulement le sentiment

subjectif de sécurité mais limitent aussi les causes réelles d'insécurité dans les zones à risques (Nasar & al. 1993).

Signalons que les piétons sont très vulnérables. Il faut donc faire attention à limiter les causes d'accidents avec les automobiles mais aussi à tenir compte des personnes âgées, des enfants et des personnes à mobilité réduite.

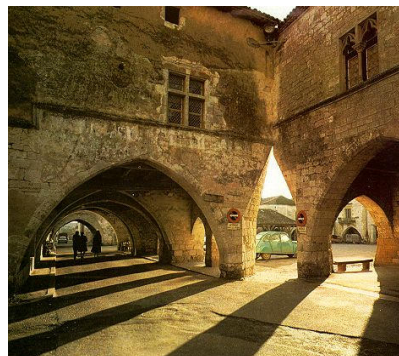
Enfin, insistons sur le fait que créer des conditions environnementales variées dans un même espace ou entre des lieux rapprochés offre aux citoyens le choix de s'adapter en se déplaçant vers une zone plus confortable. Ainsi, la présence d'une distribution de zones ensoleillées et ombragées sur une même place permet aux utilisateurs de l'espace de choisir les conditions qui lui correspondent. De même, si un même lieu peut être atteint par deux itinéraires, dont les conditions environnementales sont différentes (soleil/ombre, animation sonore/calme, ...), les piétons ont la possibilité de choisir le parcours qui leur convient.



(Photo : S.Reiter)

Des conditions environnementales non-neutres associées à une opportunité d'adaptation apportent une plus grande satisfaction aux piétons. Ainsi, il ne faudrait pas voir le manque de neutralité physiologique comme une perte de confort mais bien comme la liberté retrouvée de pouvoir s'adapter à son environnement. Il s'agit d'abandonner l'idée d'un confort immuable pour celle d'un confort changeant, dynamique, adapté.

2.2.8 La naturalité du lieu



(Photo : K. de Myttenaere). (Photo : B. Deprez).

De nombreuses études ont montré que les éléments naturels sont bénéfiques pour l'être humain. Ainsi, la lumière naturelle est mieux adaptée à l'œil humain que la lumière artificielle. L'adaptation complète de l'œil passant de la lumière du soleil à des luminances intérieures cent fois plus faibles fournies par l'éclairage artificiel demande environ 15 minutes. Mais si l'espace intérieur est éclairé naturellement, l'adaptation est deux fois plus rapide, ce qui met en évidence l'adéquation

harmonieuse entre la lumière du jour et le système visuel (Reiter & De Herde 2001).

Ulrich a découvert que des malades retrouvaient plus rapidement la santé lorsqu'ils étaient capables de voir un paysage naturel à une distance moyenne à la place de voir un mur blanc (Ulrich 1984). Une étude en Norvège compare deux groupes de personnes travaillant dans des bureaux, l'un agrémenté de belles plantes et l'autre sans végétation. Fatigue, mal de tête et problèmes de concentration étaient diminués de 23% dans le cas du bureau qui présentait une végétation agréable (Fjeld 1998). Ces études prouvent que la végétation est un élément essentiel pour le confort des êtres humains.

De nombreuses études du phénomène « sick building syndrome » (SBS) montrent une relation statistique significative prouvant que les bâtiments équipés d'un système à air conditionné, avec ou sans humidificateur, sont associés à une augmentation de 30 à 200% des symptômes de SBS par rapport aux bâtiments ventilés naturellement (de Dear & Brager 2002).

De plus, les êtres humains préfèrent les éléments naturels aux éléments artificiels. A partir d'études sur le terrain à travers toute l'Europe, Compagnon et Goyette-Pernot arrivent à la conclusion que, du point de vue de l'appréciation du champ lumineux par les usagers, les personnes qui utilisent les espaces ouverts apprécient toujours plus de lumière naturelle et particulièrement celle du soleil. De plus, la sensation de "confort visuel" est accrue dans les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants (Compagnon & Goyette-Pernot 2004).

De même, du point de vue acoustique, les sons naturels sont préférés aux sons artificiels (Carles & al. 1999 ; Kang & al. 2004). Les gens partagent généralement une opinion commune en préférant des sons naturels et culturels plutôt que des sons artificiels. Les sons provenant des véhicules et de la construction sont considérés comme très impopulaires, tandis que les sons générés par des activités humaines (parole, jeux d'enfants,...) sont normalement estimés comme plaisants ou neutres selon les cas. Signalons que la musique "live" est toujours très appréciée, quelle que soit le type de musique (classique, populaire,...) car les passants sont généralement plus intéressés par l'activité des musiciens que par le type de musique. Cependant, lorsqu'une musique est diffusée par des haut-parleurs, le type de musique et le niveau sonore doivent être soigneusement considérés pour correspondre aux désirs des utilisateurs de l'espace (Kang & al. 2004). De même, le bruit engendré par le trafic autoroutier est perçu comme inconfortable alors qu'un même niveau sonore est agréable lorsqu'il s'agit de l'ambiance sonore créée par la présence d'une fontaine. L'utilisation de fontaines est donc un moyen intéressant de créer un masque sonore par rapport à d'autres bruits urbains moins appréciés. La photo ci-dessous montre les fontaines de Trafalgar square à Londres qui masquent le bruit des autobus et des voitures longeant la place.



Le son naturel des fontaines à Trafalgar square (Photo : S.Reiter).

Une étude de Yang et Kang a porté sur la comparaison de la perception subjective du niveau sonore engendré par trois sources de bruits différentes, situées dans un même lieu public et pour un même niveau sonore mesuré (Yang & Kang 2005). Les sources de bruit comparées étaient : la démolition d'un immeuble, une fontaine à débits importants et le mélange du bruit de la démolition et de la fontaine. Les sons de démolition étaient perçus comme les plus forts, puis le mélange des sons et enfin le bruit de fontaine était sous évalué. Par ailleurs, cette étude a permis de constater que :

- dans le cas de la démolition de l'immeuble, l'inconfort est croissant avec le niveau sonore.
- dans le cas de la fontaine toute seule, une augmentation du niveau sonore n'a pratiquement aucun impact sur l'évaluation du confort acoustique, ce qui souligne encore une fois l'importance de la naturalité des éléments utilisés dans les ambiances urbaines.
- dans le cas des deux bruits superposés, le confort semble davantage lié à la perception de la fontaine quand le niveau sonore général reste en-dessous de 70 dBA mais devient fort influencé par la démolition au-dessus de cette valeur limite. Ce comportement est vraisemblablement lié à l'effet de masque acoustique généré par la fontaine jusqu'à un niveau sonore de 70 dBA. Ainsi, cette étude montre que l'utilisation de masques sonores en milieu urbain est une technique efficace pour améliorer le confort acoustique et que le niveau sonore de ce masque peut aller jusqu'à 70dBA.

D'autre part, dans les espaces où les changements climatiques apparaissent naturellement, des modifications importantes de l'environnement physique sont mieux tolérées (Nikolopoulou & Steemers 2003).

Enfin, dans les enquêtes du projet européen RUROS, une grande partie des personnes qui éprouvent une sensation de confort dans un environnement inconfortable sont juste là pour « faire une pause » dans leur travail. Cet exemple montre bien que de nombreuses personnes sortent dans des conditions d'inconfort uniquement pour profiter d'un environnement naturel. Le bénéfice qu'ils tirent d'une expérience de naturalité (par rapport aux ambiances artificielles intérieures) est donc supérieur au désagrément lié à l'inconfort thermique (Nikolopoulou & Lykoudis 2005).

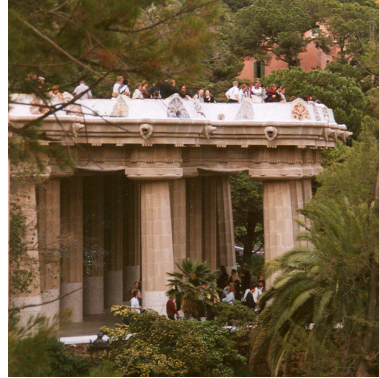
Il y a différents types d'éléments naturels qui s'insèrent facilement dans un milieu urbain ; citons: les éléments climatiques, la végétation, les surfaces d'eau, ... La mise en valeur d'un rayon de soleil ou de mouvements d'air peut être attirante pour les citoyens trop habitués à des environnements artificiels.



Éléments d'aménagement naturels (Photos : S.Reiter).

Il est également important de créer des espaces qui nous relient indirectement au monde naturel. Signalons qu'une caractéristique essentielle de la nature est son

caractère cyclique. Les formes arrondies et sinueuses rappellent aussi les évolutions naturelles. Les photos ci-dessous montrent le bord ondulé en céramique qui fait le tour de la terrasse centrale du parc Güell à Barcelone dont la naturalité de la forme est valorisée par ses fonctions multiples : sculpture décorative, ensemble de bancs pour se reposer et balustrade au bord du vide.



Terrasse du parc Güell à Barcelone (Photos : S. Reiter).

En conclusion, **la naturalité d'un lieu est un caractère essentiel pour le confort des personnes.** La vie moderne nous isole de plus en plus du monde naturel et ces questions devraient devenir critiques vu la croissance de l'urbanisation. Il y a deux corollaires à cette assertion:

- nous devrions augmenter les éléments naturels dans nos villes ;
- nous devons concevoir des espaces qui offrent des caractéristiques similaires à celles que le monde naturel peut nous offrir.

2.2.9 Le caractère signifiant du lieu

En tant qu'êtres humains incarnés dans le monde, notre expérience sur Terre est en permanence une synthèse entre notre perception du monde à travers la matérialité, par notre corps, et à travers l'esprit, par la symbolique, le langage, l'imaginaire.



Cloître à Rome (Photo : S.Reiter).

Tout élément perçu est porteur de sens, qu'on le veuille ou non. A tout moment, un espace et ses constituants émettent des messages (beauté, signal d'avertissement,...). **Le caractère signifiant d'un lieu influence le confort des personnes qui s'y trouvent.**

Il faut signaler qu'une recherche esthétique s'inscrit fondamentalement dans la conception signifiante d'un espace. Or, la qualité des vues offertes aux piétons est un élément important du confort visuel. Une expérience visuelle positive peut être générée par des vues dégagées vers le paysage ou les bâtiments environnants, une belle végétation, des façades spectaculaires, un mobilier urbain de qualité (Reiter & De Herde 2001, Compagnon & Goyette-Pernot 2004). Ces facteurs qui sont source « d'agrément visuel » relèvent de l'esthétique et correspondent au caractère signifiant du lieu.

Dans les espaces ouverts et totalement dégagés, la direction du regard est le plus souvent tournée vers les zones d'activité humaine intense (par exemple des enfants qui jouent) ou vers le « noyau » du site, c'est-à-dire la surface pour laquelle le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants (Compagnon & Goyette-Pernot 2004). De manière simplifiée, on peut estimer le « noyau » d'un espace public comme la surface dont tous les points sont situés à une distance des bâtiments supérieure à deux fois leur hauteur. Ces zones devraient donc être spécialement étudiées pour être attrayantes du point de vue visuel.



Zones d'activités humaines. (Photos : S.Reiter).

D'autre part, signalons qu'il est important qu'un espace soit conçu pour être « lisible » pour ses différents utilisateurs. Mais saturer un espace de signes en facilite rarement son usage... Les publicités et les panneaux de signalisation routiers ont souvent tendance à envahir l'espace public au point d'en faire perdre tout caractère signifiant !



Surcharge de panneaux et signaux à Longueuil. (Photo : Jacques Bourdon).

Les piétons se déplacent lentement ; la vitesse de marche moyenne est de 1.3 m/s pour un adulte et 17% des piétons ont une vitesse inférieure à 1m/s. Circuler à pied est idéal pour une distance de 0 à 2km. Les bicyclettes, plus rapides, conviennent parfaitement à des distances allant jusqu'à 5km. Ces deux moyens de transport écologiques sont donc idéaux pour couvrir les distances moyennes que font les personnes en une journée à savoir environ 6km. Il est donc essentiel de créer des espaces publics qui tiennent compte de leur perception et qui auront à leur yeux un caractère signifiant.

Vu leur lente progression, les piétons ont une vision optimale de leur environnement. Le champ visuel binoculaire d'un piéton est de 230° latéralement et de 150° verticalement. Ce champ est encore augmenté par la possibilité de bouger les yeux et de tourner la tête tout en marchant. Donc, les piétons peuvent facilement observer l'entièreté de leur environnement. En revanche, les automobilistes se concentrent sur une petite partie centrale de leur champ visuel. Leur champ de vision se réduit d'autant plus que la vitesse de l'automobile augmente.

A ce sujet, synthétisons quelques limites qui concernent la perception visuelle:

- pour percevoir entièrement la façade d'un bâtiment, les usagers doivent la voir sous un angle inférieur ou égal à 27° au-dessus du plan horizontal passant au niveau des yeux. Cette condition est réalisée pour des personnes se tenant à une distance plus grande ou égale à deux fois la hauteur de la façade (Compagnon & Goyette-Pernot 2004). Pour mettre en évidence un bâtiment historique signifiant, il est important de tenir compte de cette règle.
- la distance maximale entre usagers permettant encore de reconnaître un visage est de 24 mètres (Compagnon & Goyette-Pernot 2004). La taille d'un espace public va donc influencer le type d'activités sociales qui peuvent s'y produire.
- le confort est accru dans les zones ensoleillées ainsi que celles où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants ($H/W < 0.5$). Le ciel et le rayonnement solaire direct favorisent le confort des piétons grâce à leur naturalité et leur symbolique.

La gêne qu'une personne éprouve par rapport à un bruit dépend notamment de la possibilité d'identifier le son ou de le comprendre (Blasco 2001). D'autre part, les personnes apprécient spécialement les éléments qui apportent du sens à un espace sonore. L'analyse de différents types de sons individuels et de leur répercussion sur le confort acoustique des piétons montre que l'évaluation du confort acoustique est fortement influencée par le type de source sonore. Introduire un son signifiant dans un espace public peut donc considérablement améliorer le confort acoustique (Yang & Kang 2005).

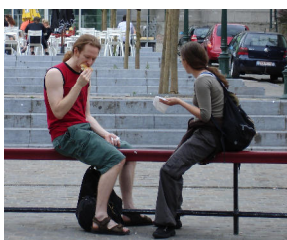
La musique est en général un élément sonore très apprécié, à condition de ne pas dépasser un niveau fort élevé. Quand il y a de la musique dans un espace public ouvert, l'augmentation de son niveau sonore a peu d'influence sur le confort acoustique des personnes qui reste globalement constant. Par contre, le changement d'un type de musique à un autre modifie fortement l'évaluation du confort acoustique. Les discours et la musique live sont généralement préférés par rapport à d'autres types de diffusion sonore. Enfin, les performances des musiciens ou le cadre de l'activité dans lequel ils s'inscrivent a également son importance dans la perception acoustique de l'espace par ses utilisateurs (Yang & Kang 2005).

La fonction symbolique est nécessaire à tout être humain. Les possibilités d'une symbolisation de l'espace public sont multiples. Citons la mise en évidence du relief naturel, de l'eau et des éléments microclimatiques (notamment le vent et la lumière), comme moyens de liaison aux quatre éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu. Ces quatre éléments participent au processus de symbolisation des lieux de par leurs références archétypales. Rendre ces éléments visibles, perceptibles ou accessibles par des aménagements appropriés des espaces publics favorise l'émergence de lieux signifiants.



(Photo : S. Reiter).

Si un même choix technique peut être traduit de différentes manières dont l'une d'elle permet une appropriation symbolique, c'est cette solution signifiante qui devrait toujours être choisie. Prendre en compte les facteurs historiques, culturels et esthétiques d'un lieu est essentiel pour donner sens à un espace public. L'artiste Jozef Legrand a conçu « l'arbre à palabres » sur la place Breughel à Bruxelles. Lors de sa première visite du lieu, l'artiste a rencontré des jeunes assis sur les bancs qui lui ont expliqué le rôle de journal collectif des habitants que constituaient pour eux ces bancs : *"On inscrit dessus nos amours et nos amitiés"*. Son souci dès lors a été que son oeuvre d'art urbaine puisse participer à cette dynamique. Son intervention comprend la plantation d'un grand arbre en dessous duquel est placée une structure en bois et en métal suivant les lignes d'une arabesque. La structure peut servir de banc ou d'accoudoir et peut accueillir des gravures, écritures, peintures, stickers ou autres témoignages de la vie sociale du quartier. Ce projet est donc signifiant à deux niveaux : celui d'oeuvre d'art pour tout passant et celui de la prise en compte de la vie sociale de ce quartier spécifique pour ses habitants.



« L'arbre à palabres », sur la place Breughel à Bruxelles. (Photos : S. Reiter).

Nous « préférons » un élément signifiant à d'autres informations du champ visuel, même lorsque celles-ci sont formellement plus prégnantes ou qu'on ne perçoit qu'un fragment de l'élément signifiant. Il est donc toujours important de mettre en valeur les éléments signifiants d'un site : traces historiques, architecture de qualité, éléments naturels spécifiques, ...

2.2.10 La globalité de la sensation de confort

Selon les paroles de Michel Serres, dont la pertinence est évidente: « ... *aucun corps n'a jamais senti et seulement senti l'odeur unique d'une rose. (...) Le corps sent une rose et mille odeurs alentour en même temps qu'il touche de la laine, voit un paysage multiple et frémit sous les vagues du son, en même temps qu'il refuse tout ce bariolage sensible pour imaginer à son aise, se recueillir abstraitement ou tomber en extase, travailler activement ou interpréter de dix manières son état sans cesser de l'éprouver.* » (Serres 1985) Ainsi, il est toujours délicat d'étudier un aspect spécifique du confort alors que l'être humain perçoit, ressent et se représente son environnement par intégration de l'ensemble des informations qu'il a appréhendées au moyen de ses cinq sens simultanément.

Le confort est une sensation provenant d'une perception globale de notre environnement. L'ambiance ressentie en découvrant un espace provoque généralement chez l'individu une réaction immédiate pouvant aller de l'attraction à la répulsion. Cette impression générale provient d'une synthèse d'éléments objectifs et subjectifs. Par exemple, signalons qu'une place qui correspond parfaitement aux critères de confort thermique, visuel, acoustique et respiratoire peut toutefois être un espace malsain pour les piétons si elle présente une caractéristique d'insécurité...

Cette constatation que les humains ressentent le confort de manière globale implique qu'ils mettent beaucoup de temps à percevoir la cause de leur insatisfaction. Cependant, les personnes sont très sensibles à des situations qu'elles perçoivent comme inconfortables.

Généralement, les personnes ne recherchent pas les emplacements qui procurent l'équilibre physiologique optimal mais elles fuient les situations ressenties comme inconfortables. De plus, lorsqu'on atteint certaines conditions de climat extrême (canicules,...), le microclimat devient l'élément primordial pour l'utilisation d'un espace (Nikolopoulou & Steemers 2000).

Il est important ici de rappeler que les différents critères qualitatifs du confort extérieur développés dans ce chapitre interagissent bien entendu les uns avec les autres. Ainsi, par exemple, l'influence positive de la naturalité fait qu'en général un brise-vent végétal est mieux perçu qu'un système de brise-vent artificiel. Cependant, une étude acoustique de Louwers a montré que cette conclusion devient erronée lorsque le niveau sonore est très élevé. Il semble donc que l'influence des attentes positives créées par la vision végétale rend encore plus pénible le niveau sonore très élevé (Louwers 2001). Cette expérience renvoie à un des critères qualitatifs précédents : l'importance de l'identification d'une ambiance et donc de la cohérence entre les stimuli sonores et visuels. Dans ce cas, la trop grande incohérence entre la coupure végétale et le niveau sonore l'emporte sur l'appréciation de la naturalité du brise-vent.

De même, ce critère de naturalité est à associer avec le désir de rencontrer une diversité d'ambiances à proximité. Ainsi, dans des quartiers très denses, l'introduction d'éléments naturels apporte des bienfaits considérables. Par contre, cela n'implique pas qu'il soit judicieux de planter des arbres à tort et à travers dans la ville mais plutôt de répartir harmonieusement les zones végétales à travers l'ensemble de l'urbanisation. Prenons l'exemple du Sablon à Bruxelles ; il est évident que le square du petit Sablon offre une qualité de confort qui est en partie alimentée par la naturalité du lieu : ses arbres, ses parterres, sa fontaine. Par contre, un réaménagement de la place du grand Sablon en square serait dommage vu la proximité du square du petit Sablon et du parc de Bruxelles ; il serait plus judicieux dans ce cas d'offrir une ambiance très différente et correspondant mieux au contexte de la place.

D'autres critères qualitatifs vont se renforcer l'un l'autre. Par exemple, offrir des espaces publics qui ont un facteur de vue du ciel élevé correspond à différents critères qualitatifs du confort humain :

- Le rayonnement solaire permet aux utilisateurs de l'espace de se situer spatialement et temporellement.
- Les conditions microclimatiques dans des espaces fortement ouverts présentent naturellement une grande variabilité en fonction des données météorologiques.
- La présence étendue du ciel au-dessus d'un espace public y introduit un caractère de naturalité, même sans présence de végétation.
- Le ciel et le soleil sont des éléments signifiants pour la majorité des personnes. Ils font partie depuis toujours des religions, des symboles et des archétypes de l'humanité.

Une étude européenne réalisée sur de nombreux espaces publics montre une préférence ostensible des piétons pour les conditions d'ensoleillement des espaces publics. Cependant, cette préférence pour des espaces ensoleillés est plus forte aux latitudes nordiques alors qu'aux latitudes méridionales elle diminue et devient proche de la neutralité (Compagnon & Goyette-Pernot 2004). Vu l'importance de l'ensoleillement sur le confort thermique, dans les pays chauds, le plaisir induit par la présence du soleil est progressivement contrebalancé par le besoin de fraîcheur. Il est donc important de prendre en compte l'influence de certains paramètres quantitatifs sur les choix psychologiques des personnes par rapport au confort ainsi qu'inversement l'influence de certains éléments psychologiques sur l'évaluation quantitative de leur confort.

Donnons encore quelques exemples d'éléments utiles du point de vue microclimatique qui peuvent être appropriés au niveau architectural pour bénéficier de certaines qualités supplémentaires :

- Les galeries utilisées pour protéger les zones piétonnes du vent, de la pluie ou du rayonnement solaire direct peuvent aussi créer un lien continu entre bâtiments et renforcer la cohérence d'un lieu (moyen intéressant si les façades ne sont pas alignées par exemple).
- Des tours de ventilation dans le tissu urbain peuvent servir à ventiler des zones polluées ou à refroidir les espaces publics en périodes de surchauffes tout en assurant un repère visuel dans la ville.
- Un toit planté améliore le microclimat local tout en réduisant les consommations d'énergie du bâtiment et peut servir à s'inscrire de manière harmonieuse dans un environnement naturel ou d'augmenter la naturalité d'un lieu urbain.
- ...

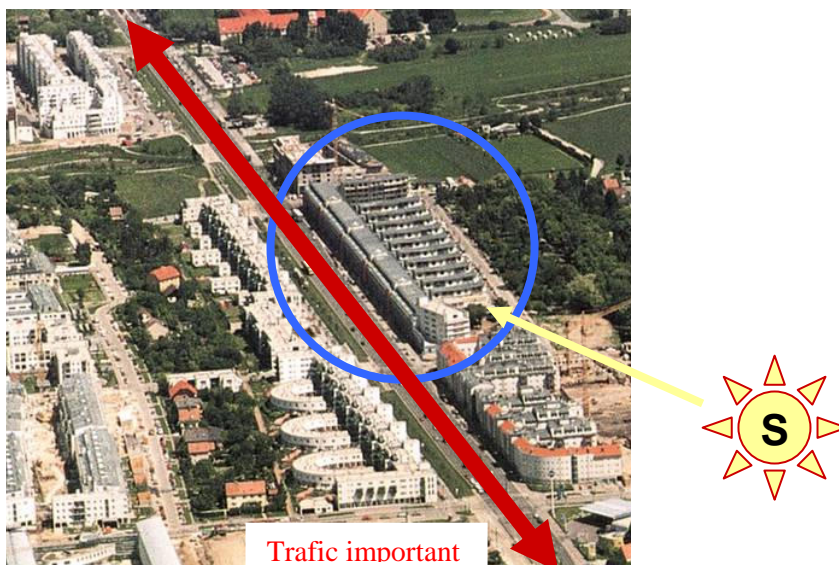
Une étude européenne réalisée sur des places réparties dans toute l'Europe a tenté de relier l'évaluation quantitative des principaux paramètres d'ambiances (température, ensoleillement, luminosité, vent, niveau sonore et humidité) avec l'évaluation globale du confort des personnes à l'extérieur. L'ensemble de ces facteurs ne couvrait que 55% de l'évaluation du confort extérieur (Yang & Kang 2005), ce qui prouve bien la grande complexité de l'étude du confort dans les espaces extérieurs et la nécessité de prendre en compte des éléments socio-culturels tel que la sécurité, les éléments signifiants ou naturels d'un lieu,....

La globalité de la sensation de confort est un élément primordial. Il y a lieu de tenir compte de l'ensemble des critères quantitatifs et qualitatifs du confort extérieur ainsi que leurs interactions pour assurer la situation la plus profitable pour les utilisateurs de l'espace.



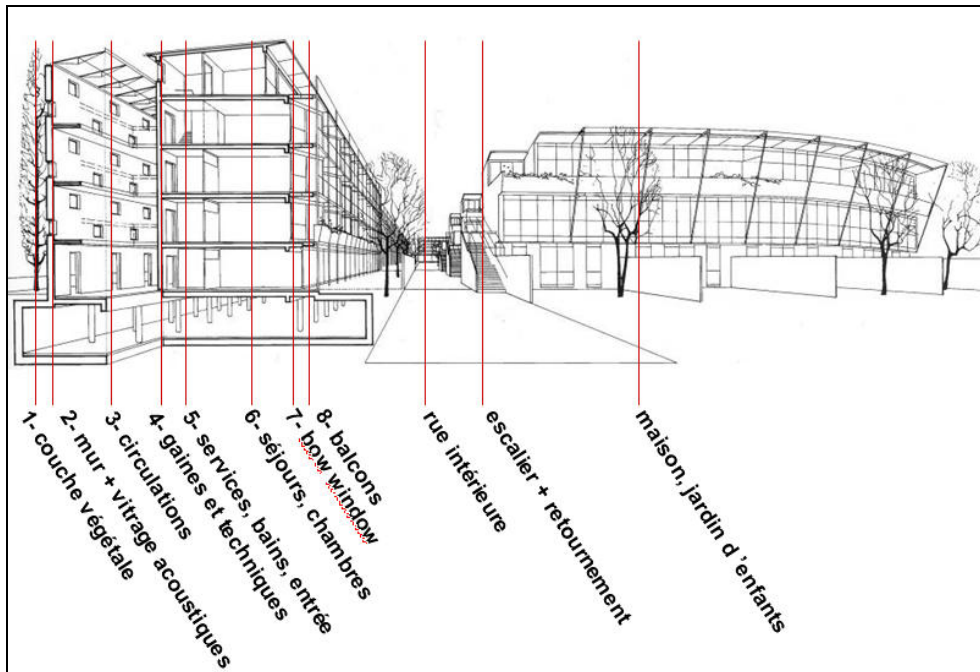
(Photo : S. Reiter).

Prenons un exemple concret. Le projet ci-dessous est un bon exemple d'un projet qui arrive à se protéger des contraintes acoustiques locales, tout en s'ouvrant aux opportunités climatiques. Il s'agit de logements sociaux mixtes construits à Vienne en 1996 et dont les architectes sont Martin Treberspurg, Georg Reinberg et Eric Raith. Sur la photo ci-dessous, nous avons encerclé le projet en question, indiqué l'orientation du soleil et souligné la présence d'une route à fort trafic sur un de ses côtés. On voit donc que le projet se protège des hauts niveaux sonores de la route par une barrière construite continue pour pouvoir s'ouvrir à l'arrière sur des espaces publics confortables.



Logements (Brünnerstrasse,21- Wohnungen), à Vienne (Photo : de Myttenaere 2006)

Un long bâtiment est conçu pour border l'artère à l'ouest du site. La coupe ci-dessous montre comment l'organisation interne de ce bâtiment permet à tous les habitants de profiter d'une qualité de vie générée par le plan masse du projet : ouverture des appartements vers la rue intérieure grâce à des terrasses individualisées et des baies vitrées orientées vers le sud-est, ... tout en se protégeant de l'autoroute urbaine qui le jouxte par une succession de couches de protection: couche végétale devant la façade, murs et vitrages acoustiques donnant sur la route, répartition intérieure des fonctions de telle manière que les circulations et les locaux techniques servent de premier tampon et les services, les salles de bains et les entrées de second tampon entre la route et les locaux de vie.



(Architectes : M. Treberspurg, G. Reinberg & E. Raith; coupe: de Myttenaere 2006).

A l'est, une voirie piétonne longe le bâtiment et dessert une série de chemins sur lesquels s'ouvrent au sud plusieurs rangées de maisons mitoyennes passives.



(Photos : K. de Myttenaere)

L'intérêt de ce projet est de montrer que les décisions des architectes ont été prises par rapport aux enjeux qui ont pu être considérés comme majeurs : le bruit et le danger générés par cette autoroute urbaine. Ainsi, plutôt que de rendre ce terrain invivable mais parfaitement orienté par rapport aux éléments microclimatiques, les architectes proposent de prendre en considération les conséquences que ce boulevard pourra avoir sur la vie des habitants au quotidien. Cet ensemble d'édifices proposent également la formation d'un espace public intéressant : une

rue intérieure à l'écart du boulevard qui ménage ainsi un espace piéton à son échelle et instaure un lieu de rencontre pour les habitants. La réussite de ce projet ne réside pas tant dans les performances particulières par rapport à un enjeu spécifique mais bien dans le fait qu'il intègre les différentes composantes du confort humain : acoustique, microclimatique et psychologique. Une telle approche oblige inévitablement l'architecte à pondérer les enjeux, les avantages et les risques majeurs d'un projet précis en fonction de son contexte naturel, construit et humain.

2.2.11 Les composantes culturelles et individuelles

Dans le processus d'appréhension du milieu, la question de la perception apparaît comme un facteur clé, qui modifie la relation entre l'homme et les structures physiques qui l'entourent. La lecture du milieu par les êtres humains est médiatisée par des filtres : images personnelles, culturelles, affectives qui impliquent aussi leurs valeurs. Ces images offrent une représentation personnalisée de l'environnement réel. Le milieu perçu par l'utilisateur d'un espace est celui qui finalement lui fournit des indices pour le comportement à adopter, selon la lecture que chacun ou chaque groupe fait de l'environnement où il vit.

Non seulement chaque sens (vue, ouïe,...) constitue un système complexe (ainsi il existe douze modes d'appréhension visuelle de la profondeur), mais chacun d'entre eux est également modelé et structuré par la culture. On ne peut donc pas échapper au fait que des individus élevés au sein de cultures différentes vivent également dans des mondes sensoriels différents (Hall 1971).

A un niveau plus personnel, souvenons-nous de la madelaine de Proust ... « *Machinalement, accablé par la morne journée et la perspective d'un triste lendemain, je portai à mes lèvres une cuillerée du thé où j'avais laissé s'amollir un morceau de madeleine. Mais à l'instant même où la gorgée mêlée des miettes du gâteau toucha mon palais, je tressaillis, attentif à ce qui se passait d'extraordinaire en moi. Un plaisir délicieux m'avait envahi, isolé, sans la notion de sa cause. Il m'avait aussitôt rendu les vicissitudes de la vie indifférentes, ses désastres inoffensifs, sa brièveté illusoire, de la même façon qu'opère l'amour, en me remplissant d'une essence précieuse : ou plutôt l'essence n'était pas en moi, elle était moi. J'avais cessé de me sentir médiocre, contingent, mortel. D'où avait pu me venir cette puissante joie ? Je sentais qu'elle était liée au goût du thé et du gâteau, mais qu'elle le dépassait infiniment, ne devait pas être de même nature. D'où venait-elle ? Que signifiait-elle ? Où l'appréhender ? » (Proust 1954). Ainsi, une seule sensation physique peut donner sens à tout un paysage. Les sensations corporelles sont donc aussi des moyens de toucher quelqu'un émotionnellement.*

Deux personnes qui décrivent une même place n'en font pas une description identique. Elles ne portent pas leur attention ni ne font le point sur les mêmes éléments ; elles n'interprètent pas les choses vues de la même manière, et cela bien souvent sans qu'elles puissent donner des raisons conscientes de leurs choix. Ces variations émotionnelles relèvent de raisons culturelles mais aussi de fondements individuels. En effet, les individus voient la réalité différemment selon leur culture, leur personnalité, leur état d'âme, leur âge, leurs expériences passées, ... Ainsi, une même place apparaît différente à un belge et à un indien, à un enfant et à un vieillard, lors d'un mariage ou d'un enterrement,...

Ainsi, le confort visuel dépend notamment du sentiment et de l'émotion particulière que peut susciter un certain environnement visuel. Par exemple, la

présence d'un rayon de soleil au cours d'une froide journée d'hiver dans un pays nordique ajoute une sensation de vitalité et d'éclat à l'espace. Dans ce cas, l'effet du rayonnement solaire direct ne se limite pas à son aspect thermique ni au niveau d'éclairage de l'espace mais participe aussi à l'élaboration d'un plaisir spécifique lié à la liaison affective que les nordiques entretiennent avec la lumière solaire. D'autre part, notre vision est évidemment influencée par des facteurs d'ordre subjectif. Citons un phénomène : les muscles de la pupille réagissent à la lumière mais aussi aux images émotionnelles. La pupille se dilate face à un spectacle agréable et se contracte devant ce qui nous gêne ou nous déplaît (Reiter & De Herde 2001).

La notion de **gêne** contient un jugement de valeur, qui peut varier considérablement suivant les individus. L'inconfort suscité par un bruit identique peut varier suivant la sensibilité propre des personnes, leur état de santé individuel, leur état affectif et émotionnel en relation avec le bruit et sa source, ou encore leur profil socio-économique et culturel (IBGE 1998). Un citoyen habitué aux bruits de la ville peut, par exemple, trouver désagréable le chant d'un oiseau à la campagne au lever du jour : on sait que c'est l'un des principaux motifs de la disparition des coqs de basse-cour dans les villages contemporains. Des personnes qui se plaignent du bruit dans leur lieu de travail se retrouvent volontairement, le soir, dans des salles de danse où les sons atteignent des niveaux dangereux pour l'appareil auditif; la télévision familiale ne gêne personne, si ce n'est la famille voisine, etc.

Au niveau acoustique, une étude sur un grand nombre d'individus répartis sur 14 sites en Europe a permis de tirer les conclusions suivantes (Yang & Kang 2005):

- Il n'y a pas de différence significative dans l'évaluation subjective du niveau sonore par les différents groupes d'âges différents.
- Il y a de fortes différences du point de vue de l'évaluation du confort acoustique selon les différents groupes d'âge. Les jeunes sont généralement moins satisfaits que les adultes et les personnes âgées le sont davantage. Mais leurs préférences par rapport aux ambiances sonores analysées étaient aussi différentes : les jeunes préfèrent les ambiances animées alors que les personnes âgées ont une préférence pour les sons naturels et culturels. Ceci souligne le rôle important des préférences qualitatives des différents groupes de population sur l'évaluation du confort acoustique extérieur par rapport au niveau sonore moyen utilisé en général.

Aucune différence d'évaluation par rapport au confort acoustique n'a été décelée entre les hommes et les femmes. (Yang & Kang 2005)

Par ailleurs, dans cette étude de Yang et Kang sur 14 sites répartis en Europe, l'évaluation subjective des niveaux sonores était légèrement différente en fonction des différentes villes dans lesquelles ces interviews ont été réalisées. Cette différence s'explique par les habitudes culturelles différentes et notamment par la différence entre l'environnement sonore moyen d'une habitation dans ces différents villes. (Yang & Kang 2005)

Enfin, les études sur le confort humain se basent en général sur des interviews de personnes qui n'ont pas toutes forcément le même vocabulaire. Il est important de signaler les difficultés de termes que présentent les connotations liées aux mots « froid » et « chaud » : dans les climats froids, les gens décrivent leur état de préférence comme chaud parce que pour eux le mot froid implique la sensation désagréable qu'ils veulent à tout prix éviter ; par contre, dans les climats chauds, la fraîcheur est l'état désiré (Baker 2000).

Cet ensemble de réflexions permet d'affirmer que **les réponses de personnes interviewées dans des enquêtes publiques sur le confort comprennent toujours une part subjective non négligeable.**

2.2.12 Similitudes entre les concepts fondateurs d'un espace public durable et les critères qualitatifs du confort des piétons

L'étude théorique des paramètres qui influencent la qualité des espaces publics nous a amené à définir trois principes fondateurs du lieu public :

- **la contextualité** (ou inscription dans son milieu),
- **la coexistence** (ou mise en présence dense et complexe des différences),
- **la cohérence** (ou identité porteuse de sens).

La contextualité est la mise en relation d'un espace spécifique à son milieu englobant. La contextualité d'un espace public, ou son inscription dans un milieu, nécessite :

- son **intégration** grâce aux continuités, au respect de la mémoire des lieux, à la création d'espaces de transition entre les différentes échelles, ... Pour s'intégrer dans son milieu, l'espace public doit profiter des opportunités offertes par le milieu et se protéger des contraintes du milieu, aux différentes échelles de l'habiter.
- sa **participation**. Un lieu public apporte des bénéfices au milieu dans lequel il s'inscrit et le protège de toute nuisance qu'il pourrait induire, aux différentes échelles de l'habiter. Cette participation induit donc une éthique, qui vise à établir une justice intergénérationnelle en poussant les habitants à prendre conscience de leur responsabilité face au Monde et à l'Histoire. « J'ai droit à la ville » se transforme en « je suis responsable de la ville ».
- son **adaptabilité**. S'inscrire dans un milieu c'est aussi être capable d'évoluer en même temps que ce milieu.

Par la rencontre de l'altérité, le lieu public devient le lieu privilégié de la mise en présence dense et complexe des différences. La coexistence, qui définit le lieu public comme identité collective, est créée à partir de trois qualités complémentaires :

- le **rassemblement** qui nécessite de la proximité et une certaine densité. Les espaces collectifs sont des lieux où les hommes sont réunis pour vivre ensemble.
- la **diversité** : variété de lieux, mixité des fonctions, hétérogénéité du bâti, simultanéité ou succession des activités,... La multiplicité sous toutes ses formes est nécessaire.
- l'**ouverture**, comme disponibilité à la transformation et à l'appropriation, tolérance de l'autre, libre accès, possibilité de laisser advenir... La complexité, l'hétérogénéité, les paradoxes, les incertitudes, les ambiguïtés sont des caractéristiques qui ouvrent à la liberté, à la possibilité de choisir et d'agir.

Le lieu public est une totalité hautement complexe. Sa cohérence, qualité qui le définit comme identité singulière, se fonde sur :

- son **identité**, c'est à dire une unité ordonnée qui assemble ses parties de telle sorte que les tensions s'équilibrent.
- son **sens**, qui révèle des valeurs, des symboles, une esthétique spécifique.
- sa **naturalité**, comme capacité d'émergence et d'intégration des différentes échelles de son être.

Par ailleurs, nous avons développé une nouvelle approche du confort dans les espaces publics urbains qui consiste à réunir des approches quantitatives et qualitatives, afin de favoriser une utilisation optimale des éléments environnementaux. Ainsi, différents critères psychologiques du confort humain à l'extérieur ont pu être mis à jour dans cette étude. Nous avons relevé dix paramètres qui influencent de manière significative **l'évaluation qualitative du confort** des personnes à l'extérieur, au-delà des composantes culturelles et individuelles. Il s'agit de:

- **l'identification d'une ambiance,**
- **la relation au contexte,**
- **la continuité des conditions environnementales,**
- **la diversité des ambiances,** (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
- **la variabilité des conditions environnementales,**
- **la perception du contrôle possible,**
- **la capacité de s'adapter,**
- **la naturalité du lieu,**
- **le caractère signifiant du lieu,**
- **la globalité de la sensation de confort.**

La comparaison entre les critères de conception d'espaces publics durables et les critères qualitatifs du confort des piétons à l'extérieur est stupéfiante : **il existe des similitudes frappantes entre les critères qualitatifs du confort humain et les qualités globales de conception des places publiques.** Nous pouvons ainsi créer un tableau de correspondances.

Stratégie	Lieu public	Environnement confortable
Contextualité	Intégration	Relation au contexte et continuité des conditions environnementales.
	Participation	Perception du contrôle environnemental possible
	Adaptation	Capacité de s'adapter
Coexistence	Rassemblement	Plusieurs choix d'ambiances microclimatiques sur une même place
	Diversité	Diversité des ambiances situées à proximité
	Ouverture à l'altérité	Variabilité des conditions environnementales
Cohérence	Identité	Identification d'une ambiance et globalité de la sensation de confort
	Sens	Caractère signifiant du lieu
	Naturalité	Naturalité du lieu

Ces similitudes soulignent le fait que la question du confort dans les espaces publics extérieurs est une question autant architecturale que technique. On peut donc y répondre par une méthode de conception adaptée, basée sur les trois principes que sont la contextualité, la coexistence et la cohérence.

D'autre part, la découverte de ces similitudes nous permet d'affirmer que **notre stratégie de développement durable des espaces publics est aussi un outil qui favorise le confort des piétons en ville.** Ainsi, cette stratégie de conception et de rénovation durable des espaces publics nous permet d'appréhender ensemble l'être et son environnement, le local et le global, le point de vue humain et la multi-dimensionnalité de notre milieu, c'est-à-dire la véritable complexité des conditions du comportement humain.

Enfin, au-delà des travaux présentés ici, cette conclusion permet de souligner l'intérêt colossal d'une démarche qui consiste à confronter les résultats issus de disciplines très variées et à tisser des liens entre différentes tentatives de compréhension de l'univers. Le développement durable de l'humanité nécessite une vision holistique et une grande interdisciplinarité. Il est donc important d'essayer de comprendre les lois qui nous gouvernent par une approche plus globale que celle à laquelle la recherche scientifique nous a habitués, de manière à mieux saisir la complexité du monde et les multiples interactions qui relient l'homme à l'univers, pour favoriser l'évolution de l'humanité sur Terre.

[2.3 Critères quantitatifs du confort extérieur](#)

Deux règles fondamentales sont d'application au niveau de la conception des espaces publics pour assurer le confort des piétons: profiter des paramètres positifs de l'environnement et se protéger de ses contraintes négatives.

Au cours de cette recherche, nous avons constaté que les critères physiologiques du confort des piétons doivent être quantifiés séparément en fonction des différents types de confort: confort thermique, confort mécanique lié au vent, confort respiratoire, confort acoustique, confort visuel et confort par rapport aux intempéries. Ces différents types de confort sont analysés en détail dans les paragraphes suivants.



Square des Ursulines à Bruxelles (Photo : S. Reiter).

2.3.1 Les critères quantitatifs du confort thermique extérieur

De nombreuses études réalisées in situ à travers toute l'Europe ont prouvé l'influence de la conception urbanistique sur les conditions du confort thermique en ville. Par exemple, le quartier de Santa Cruz à Séville est construit selon une architecture traditionnelle de rues étroites et de petites places avec des matériaux massifs peints en blanc ainsi que la présence de nombreux arbres et fontaines. Lors des jours très chauds, la température de l'air dans le quartier de Santa Cruz est de 6 à 8°C inférieure à la température de l'air mesurée à l'aéroport de Séville (Littlefair & al. 2000). Ce phénomène va à l'encontre de l'effet d'îlot de chaleur qui se produit habituellement en milieu urbain. Cet exemple montre qu'une conception urbaine adaptée au microclimat local peut réellement transformer les conditions environnementales afin de favoriser le confort thermique des piétons.

Il est impossible d'exprimer la réponse thermique du corps humain face à son environnement en fonction d'un seul paramètre tel que la température. Une température de 20°C peut par exemple être perçue comme trop chaude lorsque l'humidité est très élevée, le rayonnement solaire direct important et qu'il n'y a pas de vent alors que la même température de 20°C peut sembler trop froide un jour venteux avec ciel couvert. Les interactions entre les différents paramètres climatiques sont essentielles pour déterminer le confort thermique extérieur.

Les réponses physiologiques et sensorielles des personnes par rapport aux conditions thermiques dépendent donc d'une combinaison de différents facteurs environnementaux. Traditionnellement, il y a six paramètres à prendre en considération lors de l'évaluation du confort thermique physiologique d'un être humain (Givoni 1969, Fanger 1970) :

- quatre paramètres climatiques : la température de l'air, le rayonnement, la vitesse de l'air et l'humidité relative.
- deux paramètres humains : son activité et ses vêtements.

Ces six paramètres permettent de quantifier le bilan thermique d'une personne.

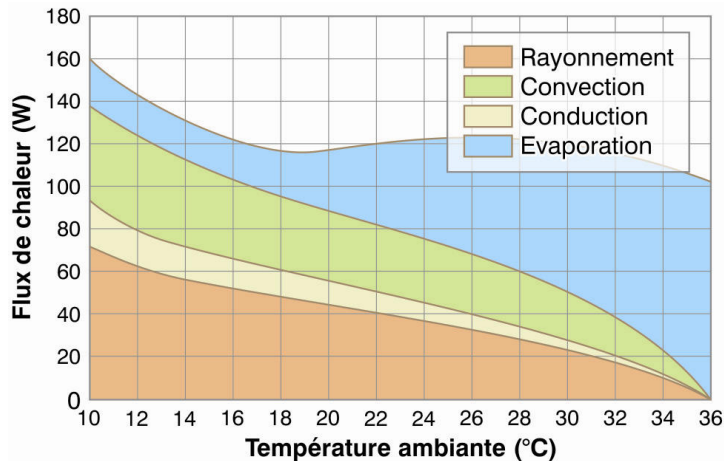


(Photo : S.Reiter).

Bien que ce bilan thermique ne soit pas suffisant pour déterminer le niveau de confort thermique d'une personne car il néglige notamment les aspects psychologiques et culturels, il y participe pour une bonne part et doit donc être pris en compte parmi les critères d'évaluation du confort de cette personne.

Le corps humain est homéotherme : il tend à maintenir une température constante. Or, notre métabolisme produit en permanence de la chaleur, de manière plus ou moins importante en fonction de son activité. Cette chaleur est éliminée par le

corps humain au travers de la peau et par la respiration. Cette élimination se fait, directement ou au travers des habits, par convection et conduction vers l'air ambiant, par rayonnement vers les surfaces voisines et par évapotranspiration dans l'air. La figure ci-dessous représente la répartition des échanges de chaleur d'une personne assise dans une ambiance dont la température est homogène, sans vent et sans rayonnement solaire direct. On notera que, dans la zone confortable, les échanges par rayonnement, évaporation et convection-conduction se répartissent en trois parts approximativement égales. Pour des températures basses, la part de rayonnement devient prépondérante. Pour les températures élevées, c'est l'évapotranspiration qui domine. Pour une personne exposée au vent, la part de convection augmenterait évidemment de manière significative.



(Roulet 2002).

La plupart des indices de confort thermique utilisés habituellement ont été élaborés pour des conditions intérieures et ne sont pas valables à l'extérieur. Les méthodes classifiées ci-dessous sont des méthodes qui ont été élaborées ou adaptées pour l'environnement extérieur, même si l'approche proposée reste souvent similaire à celle utilisée dans un environnement intérieur en y ajoutant seulement l'influence du rayonnement solaire direct.

Les méthodes quantitatives existant actuellement pour évaluer le confort thermique extérieur peuvent être classifiées en cinq groupes :

1. les méthodes résolvant l'équation de bilan thermique basée sur un modèle complexe du corps humain et sur l'évaluation des paramètres climatiques. Ces méthodes couplent généralement une équation de bilan de chaleur avec un modèle simplifié d'évaluation de la température radiante moyenne. Ces modèles ont été élaborés pour évaluer différents scénarios climatiques pour des activités et un habillement standard. Les indices les plus fréquents sont : Physiological Equivalent Temperature PET (Höppe 1999), New Effective Temperature ET new (Gagge et al. 1971), Standard Effective Temperature SET et OUT_SET intégrés à un modèle de température rayonnante extérieure OUT_MRT (J. Pickup, R. de Dear, 2000).
2. les méthodes résolvant l'équation de bilan énergétique basée sur un modèle simplifié du corps humain : perceived Temperature (PT), un modèle qui correspond au modèle de Fanger associé à un modèle d'évaluation du rayonnement extérieur mais qui ne tient pas compte du vent (Vinet, Jendrintzky), COMfort Formula - COMFA (Brown et Gillespie) : un modèle simplifié intégrant l'ensemble des paramètres climatiques et urbains bien qu'il ait été initialement développé à partir d'interviews dans des paysages ruraux.

3. des modèles graphiques très simplifiés mais d'usage très rapide regroupant les différents paramètres climatiques. Citons la charte bioclimatique d'Olgyay.
4. les indices climatiques empiriques qui créent des corrélations entre quelques paramètres climatiques spécifiques. Ils sont généralement élaborés pour certains climats particuliers. Citons par exemple le Wind-chill index ou le Discomfort Index (Sacré).
5. les indices psycho-socio-climatiques, élaborés à partir d'interviews réalisées dans des espaces publics urbains. Ils créent une corrélation entre une perception subjective et des variables microclimatiques (Actual Sensation Vote, satisfaction indexes,...) ou un indice de confort (Nikolopoulou, SAGAcité).

Il est important de souligner que beaucoup de ces méthodes négligent le fait que les zones de confort à l'extérieur ne peuvent pas être aussi étroites qu'à l'intérieur, ce qui a déjà été démontré précédemment dans cette thèse. De plus, beaucoup d'entre elles ne tiennent pas compte de l'influence du vent au-delà d'une vitesse d'1m/s, composante pourtant essentielle en milieu extérieur.

Les méthodes de la première catégorie font intervenir des calculs complexes et très précis pour déterminer le confort thermique physiologique. Ces indices de confort perfectionnés nécessitent l'utilisation de simulations informatiques spécifiques, ce qui fait qu'elles ne sont généralement pas utilisées par les urbanistes qui les perçoivent comme des techniques compliquées et trop longues à apprendre. Notre point de vue est qu'une détermination très précise du bilan thermique des personnes n'est pas nécessaire à cause de l'importance des ajustements psychologiques qui modifient largement les sensations de confort à l'extérieur. Il est toutefois utile de développer des modèles simples et facilement utilisables pour prédire les conditions physiologiques de confort thermique à associer ensuite avec les critères de confort qualitatif.

Les méthodes de la seconde catégorie présentent l'intérêt d'offrir un calcul relativement détaillé du confort thermique physiologique sans nécessiter l'utilisation de logiciels informatiques spécifiques. Elles nécessitent toutefois la résolution d'un ensemble d'équations mais celles-ci peuvent assez aisément être programmées dans un tableur du type Excel pour en réduire le temps de calcul. Nous détaillons ci-dessous la méthode COMfort Formula (Brown & Gillespie 1995) qui a été élaborée à partir d'études in situ et qui prend en compte l'influence du vent.

Les méthodes graphiques offrent l'avantage inestimable d'être spécialement rapides et très faciles d'utilisation pour des architectes et des urbanistes. Il s'agit toutefois de méthodes très simplifiées qui doivent donc être utilisées uniquement au stade de l'esquisse. Nous expliquons ci-dessous la charte bioclimatique d'Olgyay.

Les indices climatiques empiriques n'ont de sens que dans certains climats extrêmes. Ainsi, le Wind-chill index quantifie l'influence thermique du vent dans des conditions de très grand froid. Ces méthodes ne sont pas détaillées dans cette thèse de doctorat car nous nous centrons sur l'étude des climats tempérés.

Enfin, la dernière catégorie de méthodes lance un pont entre la mesure quantitative et l'évaluation qualitative du confort thermique extérieur en tentant d'intégrer la perception subjective des personnes interrogées. Il s'agit toutefois de méthodes quantitatives très simplifiées qui doivent donc être utilisées uniquement au stade de

l'esquisse. D'autre part, le point de vue qualitatif est limité dans ces modèles à une appréciation globale des personnes, sans entrer dans l'évaluation de critères qualitatifs précis comme nous le proposons dans cette thèse. Nous analysons dans ce chapitre la méthode Actual Sensation Vote (Nikolopoulou & al. 2004).

Ainsi, nous allons analyser en détail trois méthodes simplifiées, qui ont été élaborées à partir d'études réalisées à l'extérieur et non en chambre climatique. Nous commencerons par la méthode la plus rudimentaire pour nous diriger vers la méthode la plus complexe, dans l'ordre suivant :

- Actual Sensation Vote (Nikolopoulou & al. 2004),
- Olgyay's Bioclimatic Chart (Olgyay 1963),
- COMfort Formula (Brown & Gillespie 1995).

Ces trois méthodes sont faciles d'utilisation pour les architectes, les concepteurs urbains et les décideurs politiques. Les résultats de la méthode Actual Sensation Vote ne sont pas assez précis à nos yeux mais leur analyse nous permet de tirer quelques conclusions intéressantes. Nous recommandons la charte bioclimatique d'Olgyay pour une compréhension de l'interaction entre les différents paramètres climatiques, pour l'analyse du climat dans lequel un site se situe ainsi que pour une première approximation rapide et très simplifiée du confort des piétons afin d'orienter les stratégies de conception les plus importantes. Enfin, la méthode COMfort Formula nous semble allier les avantages d'une méthode simplifiée tout en offrant l'opportunité de faire intervenir les paramètres climatiques, les paramètres humains (habillement, activité) et les paramètres urbains (facteur de vue du ciel, albedo des matériaux,...). Nous avons complété et adapté les équations de la méthode COMFA afin d'en optimiser la rapidité et la précision.

Ces trois méthodes ne tiennent pas compte de l'évolution temporelle des valeurs climatiques sur la sensation de confort car l'étude du régime instationnaire est un processus très complexe et encore en sujet de recherche. De toute façon, vu l'importance du point de vue de l'adaptation psychologique dans la totalité de la sensation de confort, il ne nous semble pas judicieux de tant complexifier le calcul du bilan quantitatif.

Commençons par analyser la méthode Actual Sensation Vote. Dans le contexte du projet européen RUROS, les conditions de confort thermique extérieur ont été évaluées à travers des enquêtes sur terrain dans 14 villes européennes afin d'élaborer une nouvelle méthode simplifiée pour l'évaluation du confort thermique extérieur. Cet indice de confort thermique extérieur est basé sur près de 10 000 interviews réalisées dans les espaces publics de centres urbains. (Nikolopoulou & al 2004)

La sensation thermique effective d'un individu y est considérée égale à son choix sur une échelle de cinq niveaux allant de « très froid » à « très chaud ». L'échelle ASV (Actual Sensation Vote) utilisée comporte les cinq niveaux suivants:

- 2 = très froid,
- 1 = froid,
- 0 = neutre,
- 1 = chaud,
- 2 = très chaud.

Les paramètres microclimatiques mesurés pendant les interviews et utilisés dans l'élaboration d'un indice de confort sont : la température de l'air ($T_{air}, ^\circ C$), le rayonnement solaire global ($S_{ol}, W/m^2$), la vitesse du vent ($V, m/s$) et l'humidité

relative (RH, %). Différents modèles ont été établis pour déterminer les valeurs de l'ASV à partir de ces paramètres microclimatiques, pour différentes villes correspondant à différentes zones climatiques.

Ces modèles spécifiques sont donnés ci-dessous pour sept villes différentes:

- Athènes (Grèce):

$$ASV = 0.034 T_{air} + 0.0001 Sol - 0.086 V - 0.001 RH - 0.412 \quad (r = 0.27)$$
- Thessalonique (Grèce):

$$ASV = 0.036 T_{air} + 0.0013 Sol - 0.038 V + 0.011 RH - 2.197 \quad (r = 0.51)$$
- Milan (Italie):

$$ASV = 0.049 T_{air} - 0.0002 Sol + 0.006 V + 0.002 RH - 0.920 \quad (r = 0.44)$$
- Fribourg (Suisse):

$$ASV = 0.068 T_{air} + 0.0006 Sol - 0.107 V - 0.002 RH - 0.69 \quad (r = 0.68)$$
- Kassel (Allemagne)

$$ASV = 0.043 T_{air} + 0.0005 Sol - 0.077 V + 0.001 RH - 0.876 \quad (r = 0.48)$$
- Cambridge (Grande Bretagne):

$$ASV = 0.113 T_{air} + 0.0001 Sol - 0.05 V - 0.003 RH - 1.74 \quad (r = 0.57)$$
- Sheffield (Grande Bretagne):

$$ASV = 0.07 T_{air} + 0.0012 Sol - 0.057 V - 0.003 RH - 0.855 \quad (r = 0.58)$$

La disparité des formules obtenues pour des villes situées dans un même région climatique montre bien que la sensation thermique effective (ASV) dépend d'autres facteurs que la seule position géographique. En outre, les très faibles valeurs de corrélation des résultats obtenus pour chacune de ces villes suppriment tout intérêt à utiliser ces résultats spécifiques.

Donnons quelques valeurs typiques de conditions climatiques habituelles. Les valeurs de rayonnement solaire sont de 100 W/m² pour un faible niveau d'insolation (ex. ciel couvert ou fin d'après midi ensoleillée), 400 W/m² pour des valeurs moyennes d'insolation (ex. ciel partiellement couvert ou ciel d'hiver dégagé) et 800 W/m² pour des conditions de forte luminosité (ex. ciel estival dégagé). Les valeurs d'humidité relative sont de 20% pour des conditions très sèches, de 40% pour des conditions d'humidité moyenne et de 80% pour des conditions humides. Enfin, les vitesses de vent sont de 0.1 m/s dans un environnement calme, de 1 m/s pour une légère brise, 3 m/s pour des conditions venteuses et 5 m/s pour un vent très fort mais permettant encore le confort des piétons. Au-delà de 5m/s, les effets mécaniques du vent deviennent prépondérants.

La carte ci-dessous permet de situer ces différentes villes Européennes.



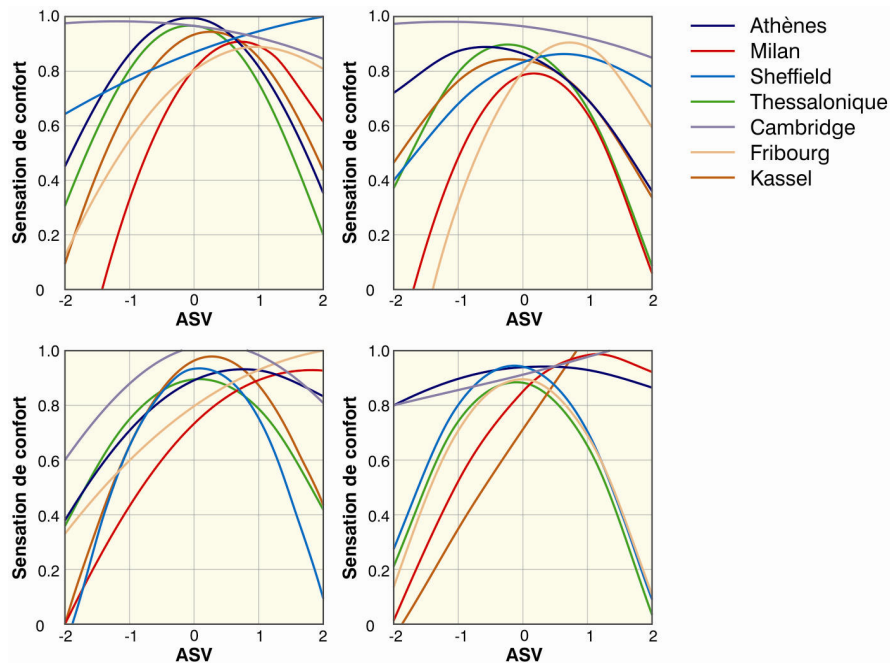
Cette étude a abouti à l'élaboration d'un modèle de calcul général pour les espaces publics européens reprenant l'ensemble de leurs données :

$$ASV = 0.049 T_{air} + 0.001 Sol - 0.051 V + 0.014 RH - 2.079 \quad (r=0.78).$$

Cette formule a été développée dans le but d'être utilisée au premier stade de conception pour identifier les zones de problèmes potentiels dans une gamme de températures allant de 5°C à 35°C (Nikolopoulou & al 2004). Ce résultat est toutefois très contestable. En effet, pour une situation sous ciel couvert (Sol = 100W/m²) et sans vent (V=0.1 m/s), la sensation neutre ne peut être atteinte que pour une température d'environ 40° quelle que soit l'humidité relative ... Le fait que cette formule n'est pas correcte est renforcé par la faible corrélation statistique entre la formule et les résultats des interviews. Il ne nous semble donc pas possible d'évaluer la sensation thermique effective d'un individu à partir des seuls paramètres climatiques repris dans cette étude.

Cette recherche a cependant le mérite d'avoir tenté de déterminer la sensation de confort effective des personnes grâce à une formule facilement utilisable regroupant toutes les caractéristiques météorologiques d'un site et en se basant sur l'évaluation des personnes quelques soient leurs activités et leurs vêtements.

Les résultats de cette recherche présentent également une impossibilité à interpréter les valeurs moyennes de l'ASV en termes de confort/inconfort. Dans ce projet, les chercheurs ont établis des courbes pour obtenir le pourcentage de personnes se sentant dans une situation confortable en fonction de cette échelle ASV pour chacune des villes étudiées et pour chaque saison. Ces courbes sont reproduites ci-dessous. Elles montrent malheureusement une absence totale de logique pour évaluer des liens entre l'ASV et la sensation de confort en fonction du moment de l'année et de la position géographique du site. En toute logique, les courbes établies pour Athènes devraient être similaires à celles de Thessalonique et celles de Cambridge similaires à celles de Sheffield... à vous de juger ! Les graphes ci-dessous donnent le pourcentage d'usagers de l'espace qui éprouvent une sensation de confort en fonction des valeurs ASV, dans sept villes différentes selon la saison.

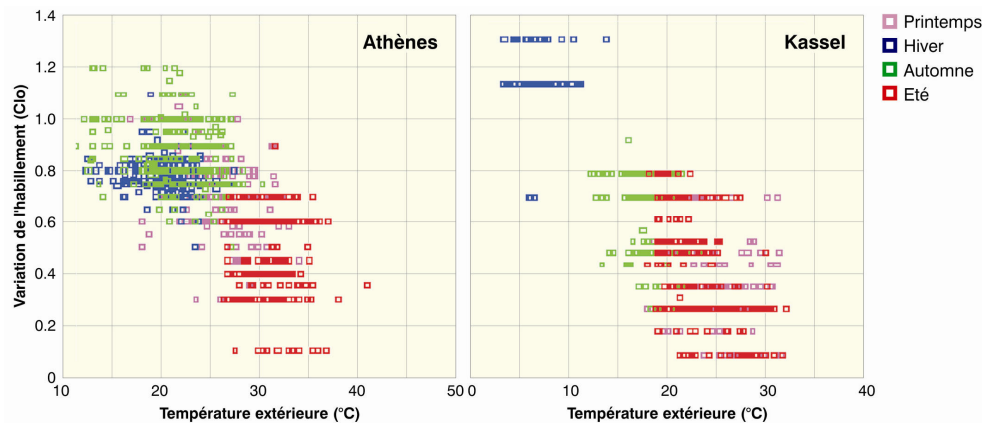


Proportion de personnes éprouvant du confort en fonction de l'ASV. (Nikolopoulou & al 2004)

Cette méthode ASV est basée sur l'hypothèse que toutes les caractéristiques d'adaptation des personnes sont prises en compte si on les interroge dans les espaces publics qu'ils fréquentent habituellement et selon leurs modes de vie. D'après les auteurs du modèle Actual Sensation Vote, cet indice tient compte des effets psychologiques de l'adaptation des personnes puisqu'il est basé sur des interviews in situ avec des personnes qui sont là par leur propre choix, qui peuvent modifier leur habillement comme elles le souhaitent, rester ou quitter le lieu,...

Bien que les auteurs de la méthode Actual Sensation Vote prétendent que les effets de l'adaptation physique et psychologique sont intrinsèques dans le modèle qu'ils ont développé, nous estimons en revanche qu'ils ont fait une erreur évidente : leur modèle n'évalue quantitativement que les paramètres climatiques et ne permet donc pas de faire varier les paramètres humains physiques (habillement, activité) et psychologiques, pour lesquels des variables supplémentaires auraient été nécessaires.

Les graphes ci-dessous représentent la variation saisonnière de l'habillement (en Clo) en fonction de la température (en °C) à Athènes pour le graphe de gauche et à Kassel pour le graphe de droite (Nikolopoulou & al 2004).



Types d'habillement en fonction de la température et de la saison à Athènes et à Kassel. (Nikolopoulou & al 2004).

Ces graphes montrent que les personnes ont des comportements vestimentaires très différents d'une zone climatique à une autre pour une même saison (ce qui est normal vu la différence de climat) mais aussi pour une même température de l'air. En effet, pour une température de l'air de 20°C, les personnes portent des habits de 0.6 à 1.2 Clo à Athènes mais seulement de 0.1 à 0.8 Clo à Kassel. En effet, l'adaptation des personnes à leur climat les fait réagir différemment dans le choix de leurs habits, leurs attentes climatiques et donc leurs sensations thermiques. Il est donc important de tenir compte du choix moyen d'habillement des personnes en fonction des données microclimatiques prévues mais aussi de la localisation du site analysé.

Le fait de ne pas avoir tenu compte des paramètres d'adaptation des personnes par leurs vêtements et leurs activités est à nos yeux une erreur importante de ce modèle « Actual Sensation Vote » qui rend ses résultats beaucoup trop imprécis.

Par ailleurs, le projet RUROS a abouti à l'élaboration d'un modèle pour le calcul de l'ASV, associé à des graphes pour obtenir le rapport confort/inconfort pour une ville donnée à une saison donnée. Cependant, les courbes établies pour chaque ville tiennent uniquement compte des interviews réalisées sur deux places de cette

urbanisation. Ainsi, les corrélations obtenues pour chaque saison pour une ville sont en fait très représentatives de deux lieux urbains et non de toute la ville. Remarquons que des villes situées dans un même pays, donc dans des zones climatiques relativement semblables, présentent parfois des courbes très différentes alors que des villes situées dans des zones climatiques éloignées présentent davantage de similitudes. On peut donc conclure que les caractéristiques qualitatives du confort expérimenté sur ces lieux sont des paramètres qui ne peuvent pas être négligés dans l'évaluation globale du confort.

Ce modèle ASV prouve donc que l'étude des données météorologiques à l'échelle microclimatique n'est pas suffisante pour déterminer la sensation de confort thermique des personnes à l'extérieur. Elle vient donc soutenir notre hypothèse de travail qui consiste à affirmer qu'il y a des critères qualitatifs, intrinsèques à la conception du site, qui participent à l'évaluation du confort des personnes à l'extérieur. Il est donc nécessaire de mettre à jour ces critères qualitatifs de conception des espaces ouverts pour favoriser l'utilisation des espaces publics urbains.

Nous comprenons que le fait de quantifier l'adaptation psychologique est un processus difficile et qu'ajouter une évaluation physiologique et une évaluation psychologique peut sembler étrange. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi de ne pas quantifier les critères qualitatifs mais de les ajouter comme des paramètres supplémentaires dont il faut tenir compte pour influencer le confort des personnes.

A nos yeux, il est important de prendre en compte les paramètres d'adaptation physiologiques et psychologiques des personnes : leurs activités, leur habillement, leur perception des caractéristiques du lieu (naturalité, signifiante,...), leur perception des conditions environnementales présentes (contextualité saisonnière, diversité des ambiances, cohérence entre les différents stimuli, ...) et de l'évolution de ces caractéristiques environnementales (variabilité, contrastes,...).

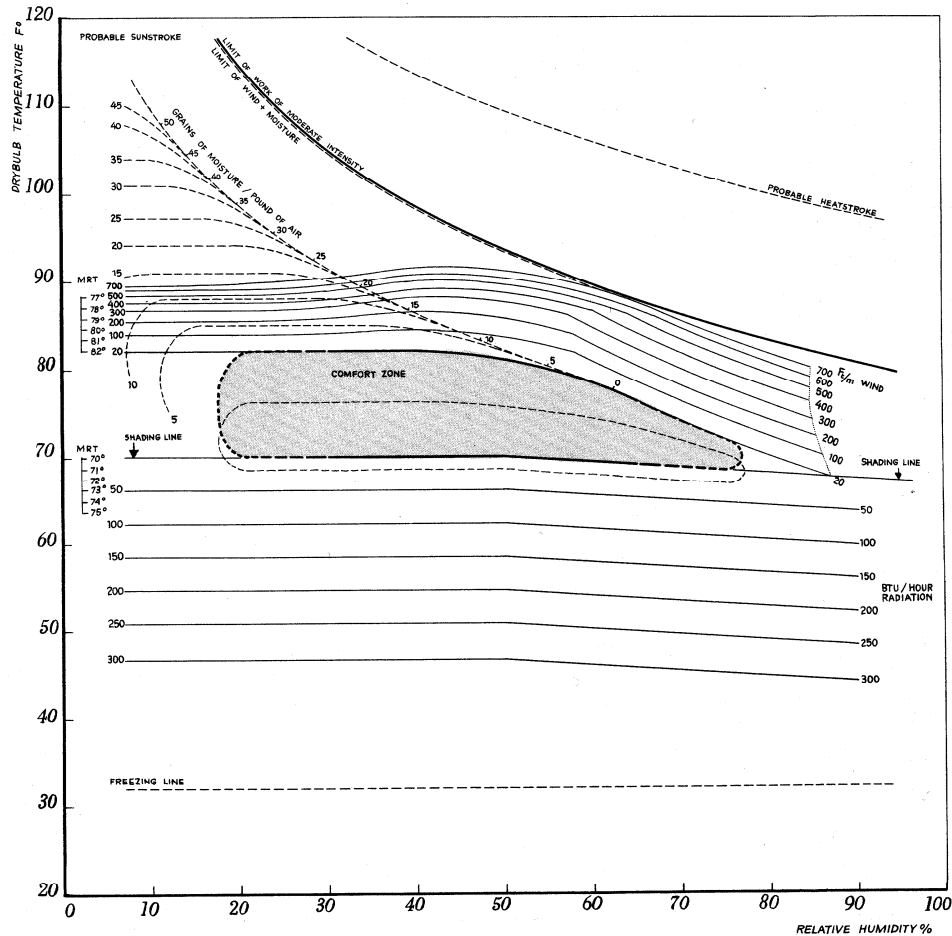
Maintenant, étudions une seconde méthode quantitative du confort thermique à l'extérieur : la charte bioclimatique d'Olgay (Olgay, 1963). C'est une méthode d'évaluation intéressante et très rapide du confort thermique extérieur basée sur une approche graphique. Elle a été élaborée à partir d'études réalisées à l'extérieur et non à l'intérieur des bâtiments.

Olgay a été le premier à relier le confort et le climat d'un point de vue graphique. Par après, la charte psychométrique a été diffusée comme un des outils de base pour les études du confort à l'intérieur des bâtiments.

La charte bioclimatique d'Olgay couvre une large bande de températures, d'humidités, de vitesses de vent et de rayonnement solaire. La zone de confort d'été (en gris) se divise en une zone de confort désirable (= le centre) et une zone de confort acceptable en pratique (= pointillés de part et d'autre). La zone de confort d'hiver se trouve légèrement en dessous. Il faut noter qu'Olgay propose un diagramme bioclimatique portant une zone de confort estivale et une zone hivernale, ce qui montre qu'il tient en partie compte des adaptations différentes des personnes en fonction de ces saisons.

Les zones de confort dessinées sur le graphe correspondent à une situation sans vent et sans rayonnement solaire direct (c'est-à-dire à l'ombre). Pour évaluer une situation venteuse ou au soleil, il faut faire glisser la zone de confort en fonction

des indications de vent et de rayonnement solaire présentées au-dessus et en dessous de la zone de confort. Il est aussi possible d'adapter la zone de confort en fonction de la masse d'eau dans l'air (grammes d'eau / kg d'air). La charte originale d'Olgay est présentée ci-dessous.



45. Bioclimatic Chart, for U.S. moderate zone inhabitants.

La charte bioclimatique d'Olgay. (Olgay, 1963)

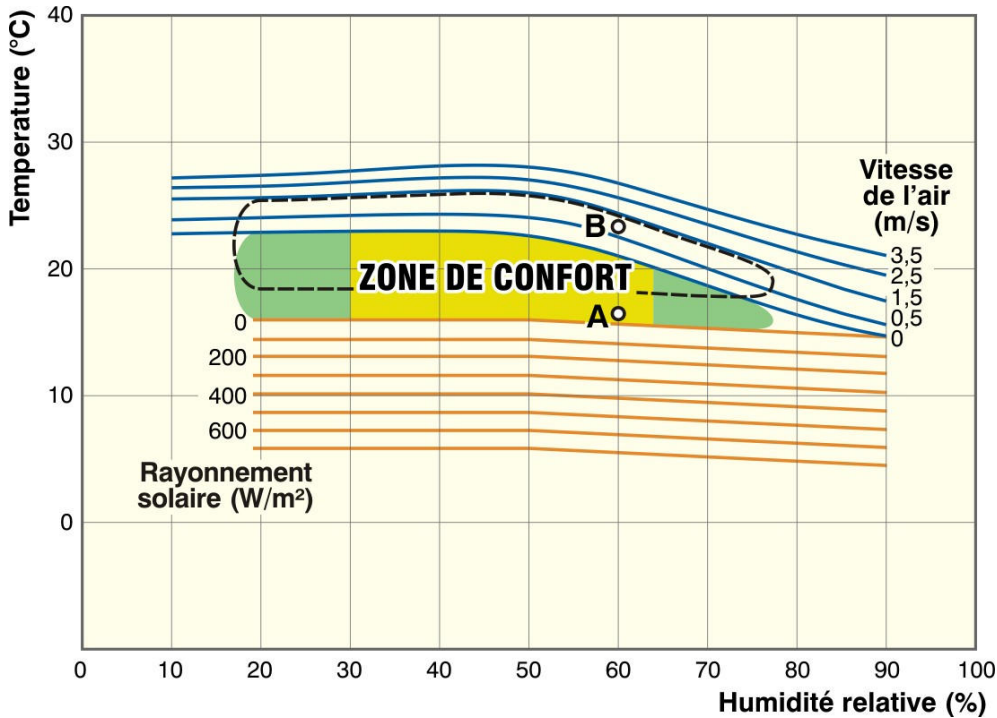
L'utilisation de cette charte est directement applicable, à l'extérieur, aux habitants des Etats-Unis, habillés de vêtements d'intérieur et engagés dans une activité sédentaire ou un travail très léger, à une altitude ne dépassant pas 1000 ft (=305m) au-dessus du niveau de la mer et pour une latitude de 40°. La zone de confort doit être adaptée si on change un de ces paramètres. Par exemple, augmenter l'habillement de 1 Clo correspond à un abaissement de la zone de confort de 7.8 °C.

L'intérêt de cette approche physiologique réside dans la combinaison d'un outil analytique et diagnostique. De plus, on peut en avoir un usage dynamique facile. Cette charte montre qu'un paramètre gênant incontrôlable peut souvent être compensé par une variation contrôlée d'un ou plusieurs autres paramètres.

Toutefois, cet outil est très simplifié: il donne la zone de confort thermique pour un type d'habillement, une activité et une altitude du soleil fixée à 45°. S'il permet de voir les paramètres microclimatiques à améliorer pour atteindre le confort physiologique, il ne quantifie pas son inconfort et ne permet pas de relier directement ces paramètres climatiques avec les caractéristiques de

l'environnement construit. De plus, il ne tient pas compte du caractère instationnaire du climat à l'extérieur.

La charte que je donne ci-dessous a été simplifiée et adaptée pour un climat européen modéré. La zone de confort colorée dans laquelle se trouve le point A est la zone de confort d'hiver; le contour en pointillé dans lequel se situe le point B définit la zone de confort d'été.



La charte d'Olgay est utile pour évaluer rapidement les périodes pendant lesquelles le confort physiologique peut être atteint dans un contexte particulier en différents points du lieu étudié.

Par exemple, en été, une personne située à l'ombre sous une température de 27°C, une humidité de 60% et un vent nul, se trouve en dehors de la zone de confort (supérieure). Un rafraîchissement d'environ 3°C devrait assurer le confort mais une ventilation de l'espace peut aussi être utilisée pour retrouver la zone de confort, grâce à une vitesse de l'air d'1.5 m/s.

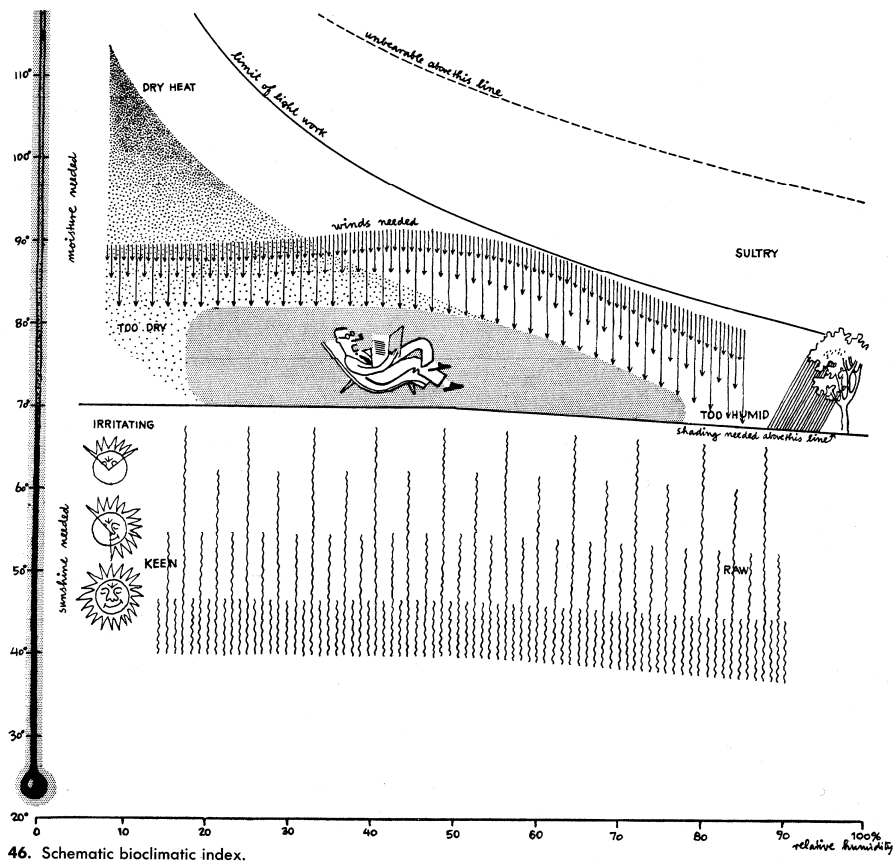
Autre exemple, si la température vaut 17°C en hiver et que l'humidité relative est de 40%, un piéton est hors de la zone de confort. Mais si cette même personne reçoit en plus un rayonnement solaire direct de 100 W/m², alors l'ensemble de la zone de confort doit être baissée jusqu'à cette ligne et le piéton se trouve maintenant dans un environnement confortable.

Il faut toutefois souligner que les données de la station météorologique ne représentent pas correctement les conditions microclimatiques d'un site précis. Ainsi, le diagramme d'Olgay devrait utiliser les valeurs microclimatiques locales et non les valeurs météorologiques si il est utilisé pour orienter la conception d'un espace déterminé. Pour faciliter encore l'utilisation de la charte bioclimatique d'Olgay lors d'une première phase de conception, nous recommandons cependant de modifier les valeurs météorologiques moyennes à partir de quelques constats microclimatiques de base tels que la disposition de la végétation, une très grande

hauteur des bâtiments générant de forts courants d'air au niveau piéton, ... Par exemple, le rayonnement solaire est réduit de 20 à 60% sur une place arborée par rapport à une même place dégagée lorsque le ciel est clair en été. Ce type d'évaluations microclimatiques sont détaillées dans la troisième partie de ce doctorat.

Les résultats quantitatifs du confort thermique extérieur tirés de la charte d'Olgay devraient alors être évalués en liaison avec les critères qualitatifs du confort extérieur pour voir quels sont les éléments climatiques utiles à modifier pour assurer le confort thermique de la majorité des utilisateurs de l'espace pendant le plus longtemps possible, en fonction des activités les plus fréquentes.

La figure ci-dessous donne l'interprétation d'Olgay de sa charte pour expliquer comment les différents paramètres microclimatiques peuvent être utilisés pour étendre la zone de confort. Ce dessin a l'avantage d'être très expressif pour les architectes.



(Olgay, 1963)

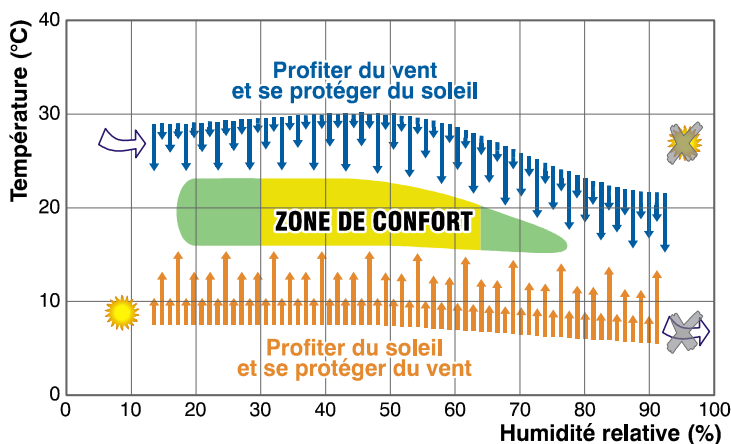
Cette représentation, dessinée par Olgay, indique les manières de bénéficier du climat : il invite à profiter du rayonnement solaire dans les zones froides et de la ventilation dans les zones trop chaudes. On peut aussi en déduire que, pour les zones où la température et le taux d'humidité sont trop élevés, il faut profiter du vent, alors que l'évaporation est utile lorsque les températures sont élevées mais sèches. C'est ainsi que les fontaines et la végétation participent largement à la création d'un microclimat confortable lorsque le climat global est chaud et sec.

Il est toutefois indispensable de rappeler que pour créer des zones climatiques confortables pour l'être humain, il faut utiliser les deux règles suivantes : bénéficier des aspects positifs du climat et se protéger de ses aspects négatifs. Or, ce dessin ne montre pas qu'il est important de se protéger des éléments négatifs du climat. Cependant, dans des situations inconfortables, la première action à poser est toujours de supprimer la cause directe de l'inconfort lorsque c'est possible. Donc, nous ne devons pas oublier de nous protéger du vent dans les zones trop froides et de nous protéger du rayonnement solaire direct dans les zones chaudes.

Concernant les paramètres microclimatiques, une attention particulière doit être portée au rayonnement solaire et à la vitesse du vent. Ces deux variables possèdent de fortes variations spatio-temporelles causant, par exemple, des conditions de confort différentes sur une même place au même instant. La température de l'air et l'humidité relative, bien qu'intervenant dans l'évaluation du confort, sont plus homogènes et dépendent davantage de la zone climatique. Il est également important de préciser que sur les quatre éléments microclimatiques importants qui affectent le bilan énergétique d'une personne, le rayonnement solaire et le vent sont les éléments les plus facilement modifiables et les plus dépendants d'une conception judicieuse de la morphologie urbaine (Brown & Gillespie 1995). En outre, ce sont les éléments microclimatiques les plus significatifs dans l'évaluation du confort thermique en climat tempéré froid, ce qui correspond au climat belge. C'est pourquoi, le rayonnement solaire et le vent sont les paramètres météorologiques les plus étudiés dans la troisième partie de ce doctorat.

Le schéma ci-dessous synthétise les deux démarches principales de conception de la morphologie urbaine en fonction des conditions microclimatiques pour assurer l'équilibre thermique physiologique des piétons sous un climat tempéré froid:

- profiter du vent et se protéger du soleil, pour pouvoir monter la zone de confort à des températures plus hautes
- profiter du soleil et se protéger du vent, pour pouvoir abaisser la zone de confort à des températures plus faibles.



Il est intéressant de se rappeler qu'en première approximation, l'effet de compensation de la vitesse du vent et du rayonnement solaire dans les espaces extérieurs peut être estimé à partir de l'outil de base classique qu'est la charte d'Olgay. Grâce à cette charte bioclimatique (pour des vêtements donnés et pour une activité donnée et une altitude du soleil fixée), on peut par exemple déterminer l'intensité du rayonnement solaire nécessaire pour compenser une température trop basse. En effet, l'échelle de rayonnement horizontale (en W/m^2) donnée dans la charte bioclimatique montre qu'un rayonnement de $70 W/m^2$ est égal en effet à une

augmentation de la température de l'air de 1°C. Ceci est bien sûr une approximation mais elle peut être facilement utilisée pour relier les données météorologiques d'ensoleillement avec une sensation thermique.

Enfin signalons que le diagramme d'Olgay permet de visualiser facilement les avantages et les risques d'un climat particulier ainsi que les stratégies qui seront les plus utiles pour assurer le confort dans les espaces publics sous ce climat spécifique. Il suffit de dessiner sur la charte bioclimatique l'évolution journalière des conditions météorologiques mensuelles. Si on rassemble en un point la température maximale avec l'humidité minimale pour ces valeurs mensuelles et qu'on le relie à un point rassemblant la température minimale et l'humidité maximale, cette ligne montre approximativement l'écart de température et d'humidité auxquels seront confrontés les piétons sous ce climat pendant le mois examiné. Beaucoup d'informations peuvent être tirées des douze lignes qui peuvent ainsi être tracées à partir des données météorologiques moyennes par mois, notamment les stratégies bioclimatiques les plus adaptées à ce contexte.

Prenons l'exemple de la Belgique. Le tableau ci-dessous donne les valeurs minimales et maximales de la température et de l'humidité relative moyennes horaires par mois en Belgique.

Mois	Température min. (°C)	Température max. (°C)	Humidité min. (%)	Humidité max. (%)
Janvier	-9.2	14.4	83	89
Février	-5.5	10.2	76	89
Mars	-6.7	14.2	71	87
Avril	1.1	22.9	60	87
Mai	1.8	22	59	85
Juin	5.8	28.7	61	86
Juillet	6.9	25.4	63	88
Août	7.1	30	65	90
Septembre	4.9	25.6	69	91
Octobre	4.2	20	73	91
Novembre	0.6	14.7	81	90
Décembre	-6	13.3	84	90

Le graphe de la page suivante permet de voir comment ces données moyennes se placent sur le diagramme d'Olgay. Les douze lignes rouges correspondent aux conditions météorologiques moyennes mensuelles. La ligne dotée du chiffre 1 correspond au mois de janvier, la ligne 2 au mois de février et ainsi de suite.

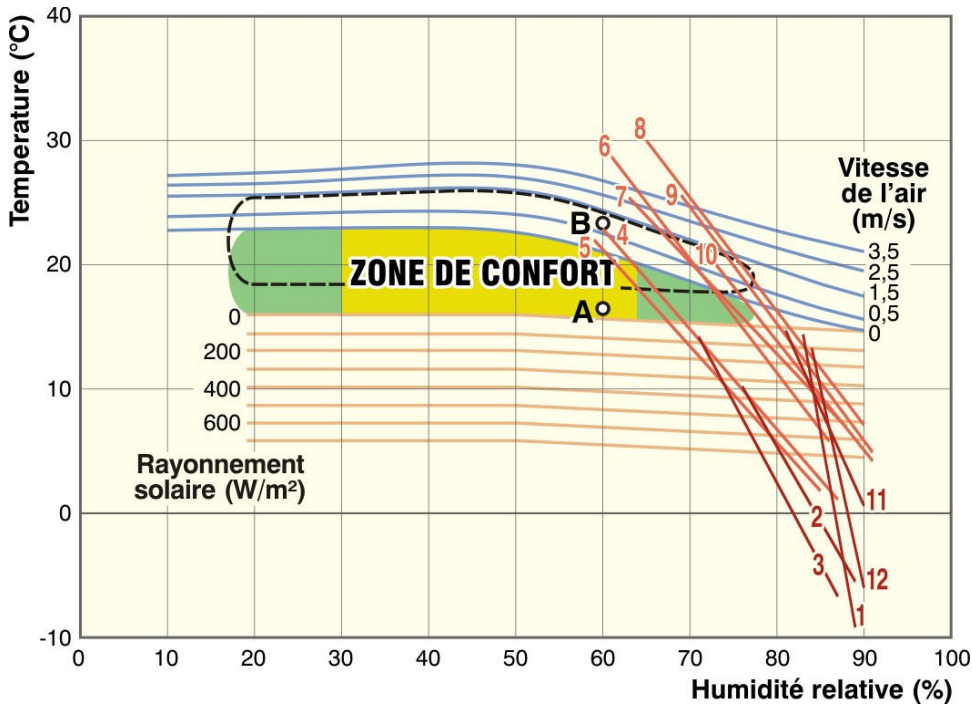
Les températures maximales des mois de novembre à mars et les températures minimales de tous les mois restent inférieures à la zone de confort pour une situation à l'ombre. Il est donc extrêmement important de valoriser le rayonnement solaire direct dans les espaces publics belges.

Les températures maximales des mois de juin à septembre dépassent la zone de confort d'été pour une situation ombragée mais sans vent. Il est donc utile de favoriser la ventilation naturelle des espaces publics pendant l'été.

L'ensemble du climat belge se situe du côté droit de la charte bioclimatique, ce qui indique une forte humidité. Le refroidissement de l'air par évaporation pour les

périodes de canicule n'est donc pas efficace en Belgique à cause de la trop grande humidité de l'air. Toutefois, il faut signaler que les surfaces d'eau, comme la végétation, gardent des températures de surfaces faibles, ce qui peut contribuer au confort thermique en limitant le rayonnement qu'elles émettent vers les personnes. Par ailleurs, les fontaines et bassins sont des éléments d'aménagement agréables psychologiquement quand il fait chaud.

Vu les très faibles températures mensuelles minimales pour les mois de novembre à mars en Belgique, le rayonnement solaire peut réduire la situation d'inconfort thermique lorsque les températures sont si basses mais il ne permet pas d'atteindre la zone de confort d'hiver pour une activité sédentaire au soleil.



Représentation des conditions météorologiques moyennes de température et d'humidité de la Belgique sur le diagramme d'Olgyay.

Les stratégies bioclimatiques les plus utiles pour la Belgique selon le diagramme d'Olgyay sont donc:

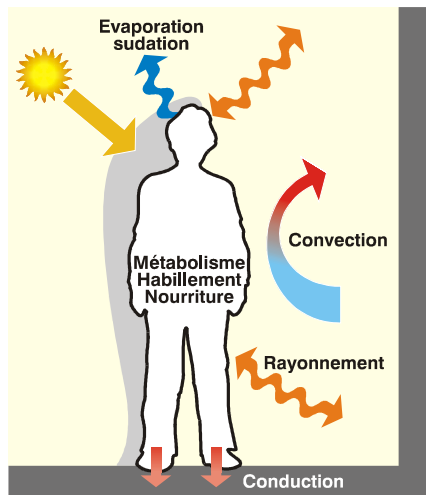
- une ouverture maximale à l'ensoleillement pour les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre.
- une ouverture à l'ensoleillement et une possibilité d'ombrage pour les mois d'avril, mai et octobre.
- une ouverture à l'ensoleillement ainsi que des zones ombragées et exposées à une ventilation naturelle (de 0 à 4.5 m/s) pour les mois de juin, juillet, août et septembre.

Signalons également vu la très grande pluviosité belge que les aménagements qui permettent de se déplacer au sec quand il pleut sont très utiles toute l'année. C'est un élément essentiel du confort des piétons qui est très souvent négligé. Nous l'analysons plus loin dans la partie sur le confort par rapport aux précipitations.

La troisième méthode d'évaluation du confort thermique extérieure que nous allons étudier est le **modèle de calcul COMFA (COMfort FormuLA)** décrit par Brown

et Gillespie. C'est une méthode simplifiée, mais nettement plus détaillée que la charte bioclimatique d'Olgay, qui consiste à calculer approximativement le bilan d'énergie complet d'une personne à l'extérieur pour évaluer quantitativement son niveau de confort thermique en fonction d'un index établi à partir d'interviews réalisées dans des paysages extérieurs (Brown & Gillespie 1995).

Nous recommandons la méthode COMFA parce qu'elle présente le grand avantage d'un calcul rapide du bilan thermique d'une personne à l'extérieur, tout en prenant en compte l'ensemble des paramètres climatiques, humains et urbains qui influencent ce bilan énergétique. Le graphe ci-dessous représente les différents paramètres qui interagissent dans l'équilibre thermique du corps humain.



Les concepteurs de projets urbains peuvent jouer à différents niveaux sur le microclimat local : par la morphologie des bâtiments, les matériaux utilisés, le mobilier urbain, ... Ils peuvent améliorer les espaces ouverts en fournissant une protection par rapport aux aspects négatifs du climat et une exposition à ses aspects positifs. La méthode COMFA permet d'évaluer quantitativement l'influence des différentes stratégies bioclimatiques sur le bilan thermique des personnes. Dans son calcul du confort thermique physiologique, elle offre la possibilité d'intégrer les éléments urbains correspondant aux principales stratégies bioclimatiques : l'ombrage ou l'ouverture au rayonnement solaire direct, la ventilation naturelle de l'espace ou la protection contre les vents, le choix de matériaux appropriés (albedo, ...) et leur exposition, l'introduction d'aménagements adaptés pour le refroidissement par évaporation (bassins d'eau, ...).

Le bilan d'énergie d'une personne peut s'écrire :

$$\text{Bilan} = M + \text{Rabs} - \text{Cond} - \text{Conv} - \text{Evap} - \text{Re}$$

où M est l'énergie métabolique du corps humain

Rabs est le rayonnement (solaire et terrestre) absorbé

Cond est la perte (ou le gain) de chaleur par conduction

Conv est la perte (ou le gain) de chaleur par convection

Evap est la perte de chaleur par évaporation

Re est le rayonnement terrestre émis par le corps humain

Lorsque ce bilan est proche de zéro, une personne se sentira probablement dans sa zone de confort thermique. Si ce bilan est nettement positif, la personne ressent vraisemblablement une impression de chaleur exagérée, tandis que si le bilan est largement négatif, la personne a sans doute trop froid.

Nous avons déjà discuté la difficulté d'établir un index de confort par rapport à des valeurs quantitatives précises. Toutefois, l'index proposé par Brown et Gillespie dans leur « COMfort Formula » semble intéressant parce qu'il a été établi à partir d'expériences sur un grand nombre de personnes en site extérieur. Il faut cependant ajouter, que les sites d'étude ont toujours été des paysages naturels et non des sites urbains. Cette étude a donné le tableau de correspondance suivant entre le bilan énergétique d'un piéton en W/m^2 et sa sensation thermique. Nous proposons d'adopter ce tableau de correspondances comme référence pour notre évaluation quantitative du confort thermique physiologique.

Bilan énergétique : B (W/m^2)	Sensation thermique
$B < -150$	Très froid
$-150 < B < -50$	froid
$-50 < B < 50$	confortable
$50 < B < 150$	Chaud
$150 < B$	Très chaud

(Brown & Gillespie 1995).

Brown et Gillespie ont proposé un ensemble d'équations simplifiées pour quantifier le bilan énergétique d'une personne de manière à pouvoir ensuite évaluer grâce au tableau ci-dessus la sensation thermique des personnes à l'extérieur des bâtiments. **Nous avons adapté certaines de ces équations afin d'optimiser le calcul du bilan énergétique du corps humain mais la stratégie globale proposée ci-dessous est celle établie par la méthode COMFA. Pour faciliter la résolution des équations dans un cas urbain précis, nous avons ajouté des explications théoriques et des estimations des valeurs typiques pour chaque paramètre du calcul.**

Pour simplifier le calcul du bilan énergétique d'une personne debout, la surface du corps humain est remplacée par un cylindre vertical de $1.8 m^2$.

Les échanges de chaleur par conduction avec le sol s'avèrent très faibles et ils sont dès lors négligés. La formule du bilan énergétique se réécrit donc :

$$\mathbf{Bilan = M + Rabs - Conv - Evap - Re.}$$

Reprenons chacun des cinq paramètres de ce bilan énergétique et définissons-le précisément.

1/ M : Energie métabolique du corps humain.

Le métabolisme représente la production de chaleur interne du corps humain nécessaire pour le maintenir à la température constante de $36.8^{\circ}C$ lorsqu'il est au repos. La température du corps humain étant généralement supérieure à celle de l'ambiance, il doit donc compenser les pertes de chaleur vers celle-ci.

M est l'énergie métabolique totale que produit le corps humain pour effectuer une activité rapportée à l'unité de surface du corps de l'individu. Le métabolisme M s'exprime en W/m^2 . Le métabolisme de base est celui d'un individu normalement constitué et au repos. Il est évalué à environ $45 W/m^2$. Le métabolisme d'une personne effectuant un travail augmente afin de compenser le travail effectué par l'individu par une production de chaleur supplémentaire. Différentes valeurs du métabolisme sont indiquées ci-après pour diverses activités. Les valeurs sont également exprimées en met, qui est l'unité d'énergie métabolique. 1 met vaut $58 W/m^2$. Le tableau ci-dessous donne les valeurs adéquates pour le métabolisme humain en fonction de l'activité de la personne (CEE 1992, Ashrae 2001).

Activité	W/m ²	met
Repos		
dormir	45	0.8
Assis (calme)	58	1
Debout (calme)	70	1.2
Marcher		
0.89 m/s	115	2
1.34 m/s	150	2.6
1.79 m/s	220	3.8
Activités de bureau		
Lire, assis	55	1
écrire	60	1
taper	65	1.1
Rouler		
voiture	60-115	1 - 2
Activités quotidiennes		
Cuisiner	90-115	1.6 - 2
Nettoyer la maison	115-200	2 – 3.4
Danser (social)	140-255	2.4 – 4.4
Tennis	210 - 270	3.6 - 4
Basketball	290 - 440	5 – 7.6

(CEE 1992, Ashrae 2001).

2/ Rabs : Rayonnement solaire et terrestre absorbé

Le rayonnement est le mode de transfert d'énergie par émission d'ondes électromagnétiques d'un corps chaud vers un corps plus froid. Tout corps soumis à un rayonnement électromagnétique en absorbe une partie et en réfléchit le reste. La partie absorbée est transformée en énergie thermique.

Le rayonnement total reçu par une personne dans un environnement quelconque est la somme de deux composantes :

- RSabs : le rayonnement solaire total absorbé, comprenant le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus.
- RTabs : le rayonnement terrestre absorbé, dit de grande longueur d'onde ou rayonnement thermique, émis par tous les corps terrestres.

Le rayonnement absorbé peut donc être évalué à partir de la formule suivante :

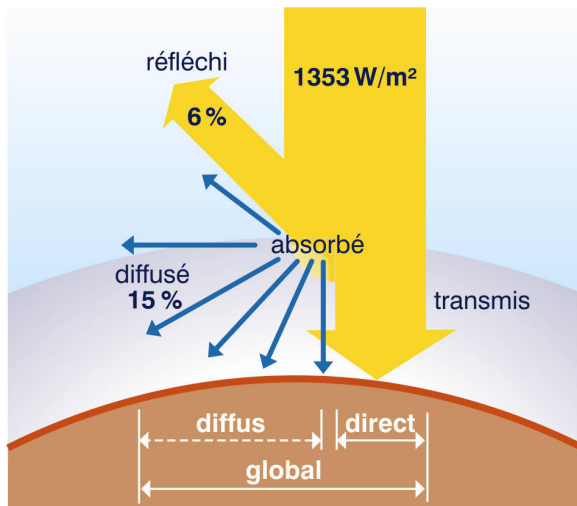
$$\mathbf{Rabs = RSabs + RTabs}$$

Nous détaillons ci-dessous le calcul de ces deux composantes du rayonnement absorbé.

2.1/ RSabs : Rayonnement solaire absorbé

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le **soleil** rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde). La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible. La Terre, dont les dimensions sont très petites en comparaison du soleil, intercepte une part si faible de l'énergie radiante du soleil que les rayons solaires qui l'atteignent paraissent constituer un faisceau parallèle.

Le rayonnement solaire atteint l'extérieur de l'atmosphère selon une valeur constante de $1\,354\text{ W/m}^2$. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Le rayonnement solaire incident à la limite de l'atmosphère se décompose, lors de sa traversée, en une composante directe qui atteint directement la surface terrestre et une composante diffuse qui atteint la surface après absorption et réflexion dans l'atmosphère. La quantité totale d'énergie interceptée par une surface terrestre totalement dégagée comprend donc une composante directe et une composante diffuse. La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus constitue le rayonnement solaire global. Le schéma ci-dessous montre cette répartition de l'énergie solaire traversant l'atmosphère.



En milieu urbain, le rayonnement solaire reçu par une personne dépend non seulement du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère mais aussi des réflexions du rayonnement solaire sur le sol et les obstacles environnants.

Soumis au rayonnement solaire, la surface d'un corps solide quelconque réfléchit une partie de ce rayonnement incident: la proportion correspondante est désignée sous le terme d'albédo. Le rayonnement solaire absorbé par une personne correspond à la fraction du rayonnement solaire reçu qui n'a pas été réfléchi à la surface de son corps. La fraction du rayonnement incident absorbée est appelée absorptance.

$$RS_{abs} = (1-A) \times (RS_{dir} + RS_{dif} + RSo + RSs)$$

Où RS_{abs} : le rayonnement solaire total absorbé par la personne

A est l'albédo de la personne

RS_{dir} est le rayonnement solaire direct reçu par la personne

RS_{dif} est le rayonnement solaire diffus provenant du ciel

RSo est le rayonnement solaire réfléchi par les obstacles verticaux

RSs est le rayonnement solaire réfléchi par le sol

L'albédo est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. L'albédo est quantifié par un chiffre entre 0 et 1 qui exprime la portion du rayonnement solaire réfléchi par rapport à la quantité reçue. Un corps, qui réfléchit la totalité du rayonnement solaire, a un albédo de 1 alors qu'un corps qui l'absorbe à 100% a un albédo de 0. L'albédo moyen d'une personne-type habillée en extérieur vaut 0.37.

$$RS_{dir} = [(R - R_d) \times T \times \tan(\alpha)] / \pi$$

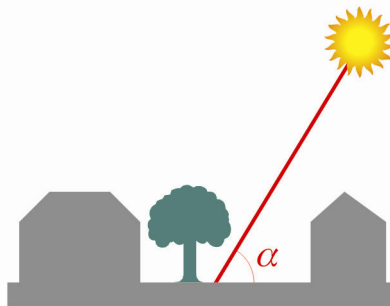
Où R est le rayonnement solaire total mesuré sur un plan horizontal

R_d est le rayonnement solaire diffus mesuré sur un plan horizontal

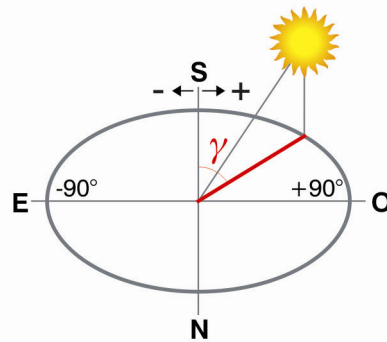
T est la transmissivité solaire des éléments situés entre la personne et le soleil

α est la hauteur du soleil

A un instant donné, la hauteur (α) et l'azimut (γ) du soleil déterminent la position du soleil dans le ciel. La hauteur du soleil est l'angle formé entre la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. α se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon vers la voûte céleste. L'azimut du soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. γ vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est.

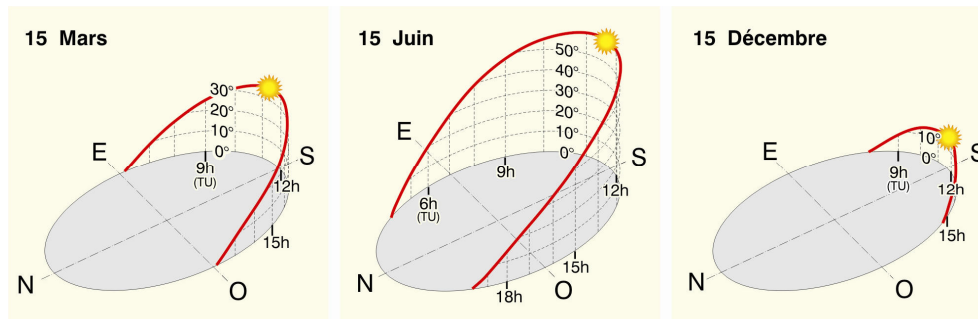


Hauteur du soleil



Azimut du soleil

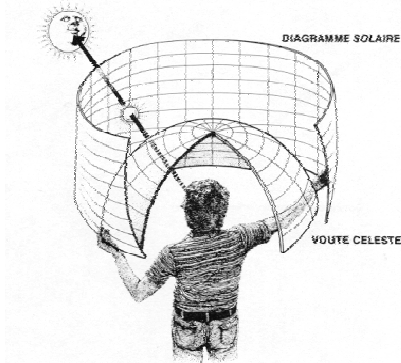
Les graphes ci-dessous montrent la course du soleil à Uccle (Bruxelles), pour les mois de mars/septembre, juin et décembre.



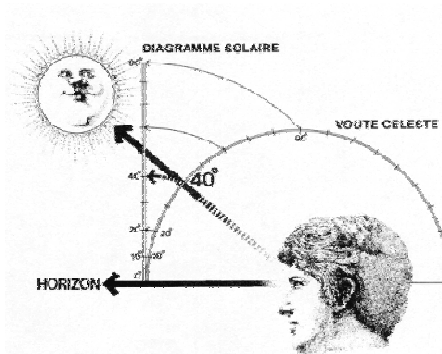
Il est donc évident que l'expression "le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest" n'est pas exacte. En effet, en Belgique, en décembre, il se lève au sud-est pour se coucher au sud-ouest, tandis qu'en juin, il se lève pratiquement au nord-est pour se coucher au nord-ouest. Ceci donne 7 heures d'ensoleillement maximum en décembre et plus de 16 heures en juin: ce sont les deux époques des solstices de l'année. Ce n'est qu'aux équinoxes de printemps et d'automne que la durée du jour est égale à celle de la nuit.

La journée solaire est la plus longue au solstice d'été, lorsque le soleil atteint sa hauteur la plus élevée et balaie le secteur azimutal le plus large, de part et d'autre du Sud. Au voisinage du solstice d'hiver, le soleil est au contraire beaucoup plus bas dans le ciel : il reste visible moins longtemps et balaie le secteur azimutal le plus faible.

Les diagrammes ou projections solaires représentent la course du soleil. Ils sont extrêmement utiles car, pour bien comprendre et tirer parti du rayonnement solaire disponible sur un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du soleil dans le ciel. Cette information est indispensable pour le calcul du bilan thermique d'une personne à l'extérieur.

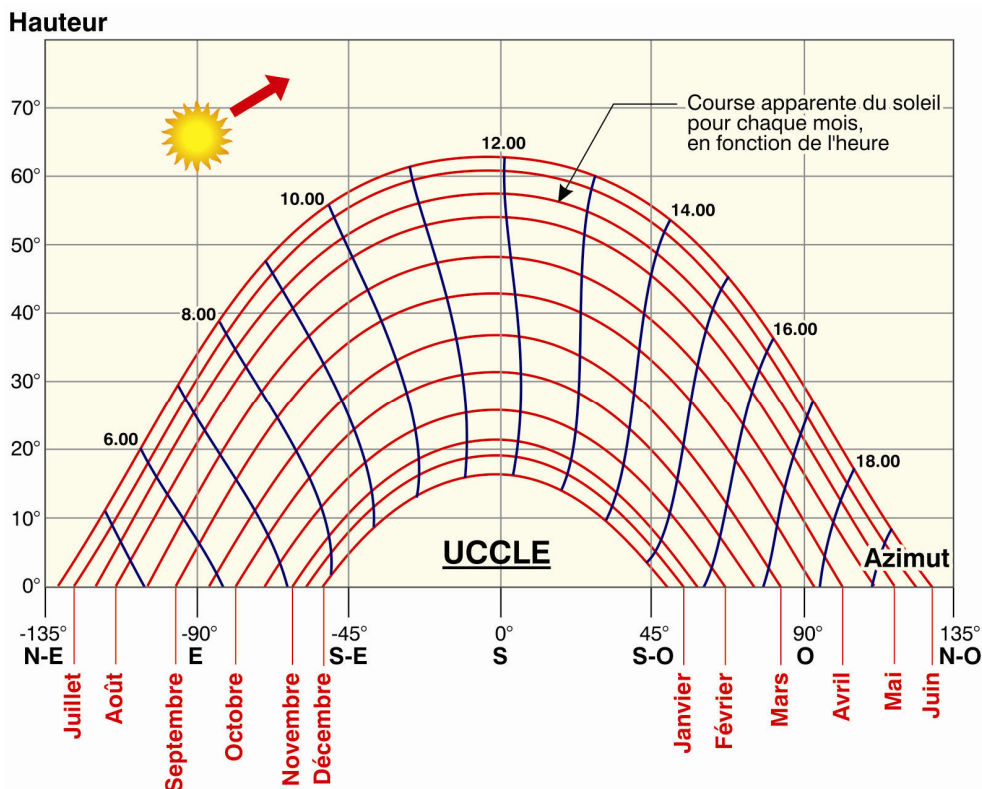


(Reiter & De Herde 2001).



(Reiter & De Herde 2001).

Le graphique ci-dessous donne le diagramme solaire en coordonnées rectangulaire d'Uccle (Bruxelles).



(Reiter & De Herde 2001).

Le tableau ci-dessous présente les valeurs précises de la hauteur du soleil (α) à Uccle (Bruxelles, Belgique), en fonction du temps universel, pour les mois de mars, juin, septembre et décembre. En Belgique, la hauteur du soleil atteint un maximum de 62° le 21 juin à 12h.univ., alors que le 21 décembre à 12h.univ. elle ne dépasse pas 16° .

Heure	Hauteur du soleil (°) en mars	Hauteur du soleil (°) en juin	Hauteur du soleil (°) en septembre	Hauteur du soleil (°) en décembre
4	/	3,1	/	/
5	/	11,4	/	/
6	/	20,4	6,0	/
7	8,7	29,9	15,4	/
8	17,5	39,3	24,3	1,9
9	25,3	48,3	32,1	8,3
10	31,6	56,0	38,3	12,9
11	35,5	61,2	41,9	15,5
12	36,7	62,3	42,3	15,8
13	34,7	58,7	39,6	13,8
14	30,1	51,8	34,0	9,6
15	23,4	43,2	26,6	3,6
16	15,2	33,9	17,9	/
17	6,2	24,4	8,6	/
18	/	15,2	/	/
19	/	6,5	/	/

La quantité d'énergie solaire reçue en un lieu varie suivant le jour et l'heure considérés, les conditions météorologiques et le niveau de pollution de l'air. Les conditions météorologiques sont traduites par l'insolation directe relative: c'est le rapport de l'insolation effective (S) à l'insolation maximale théorique possible (S_o). Par exemple, une insolation directe relative de 34% au mois de mars à Uccle indique qu'en moyenne seulement 34% du temps est ensoleillé entre le lever et le coucher du soleil.

C'est l'insolation directe relative qui détermine les différents types de ciel:

- un ciel est considéré comme **clair** ou **serein** lorsque l'insolation directe relative S/S_o est comprise entre 80 et 100%,
- un ciel est considéré comme **moyen** lorsque l'insolation directe relative S/S_o est comprise entre 20 et 80%,
- un ciel est considéré comme **couvert** lorsque l'insolation directe relative S/S_o est comprise entre 0 et 20%.

Les valeurs moyennes horaires de R et de R_d peuvent être trouvées dans les fichiers météorologiques.

En première approximation, on peut estimer R_d à partir des formules suivantes :

- R_d = 10% R pour un ciel clair et une hauteur du soleil de 60° ;
- R_d = 30% R pour un ciel clair et une hauteur du soleil de 30° ;
- R_d = 50% R pour un ciel clair et une hauteur du soleil de 10° ;
- R_d = 100% R pour un ciel clair et une hauteur du soleil en dessous de 2° ;
- R_d = 55% R pour un ciel moyen ;
- R_d = 100% R pour un ciel couvert.

Il est recommandé de multiplier cette valeur de R_d par 1.05 en milieu urbain et par 1.3 dans un contexte très pollué.

Le tableau ci-dessous donne le rayonnement solaire global pour un ciel serein, un ciel moyen et un ciel couvert, à Uccle (Bruxelles), le 15 des mois de mars, juin, septembre et décembre, pour une surface horizontale.

Jour	Heure	Eclairement énergétique global en W/m ² sur une surface horizontale : R		
		Ciel serein	Ciel moyen	Ciel couvert
15 mars	7	92	54	30
	9	352	197	89
	11	536	387	161
	13	522	350	143
	15	317	172	70
	17	66	32	12
15 juin	5	126	85	52
	7	428	273	145
	9	718	463	228
	11	853	597	282
	13	831	576	265
	15	648	427	194
	17	331	235	108
	19	69	9	8
15 septembre	7	180	131	73
	9	468	298	149
	11	630	455	208
	13	593	421	188
	15	368	254	117
	17	90	71	32
15 décembre	9	88	42	19
	11	187	130	44
	13	160	114	37
	15	46	3	2

Le tableau ci-dessous donne le pourcentage de temps pendant lequel le ciel est couvert, moyen ou serein pour chaque mois de l'année en fonction des données météorologiques d'Uccle (Bruxelles, Belgique).

Type de ciel	Mois de l'année											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Couvert	65	54	45	40	30	28	32	29	29	43	61	70
Moyen	23	33	39	44	47	53	52	55	47	37	28	20
Serein	12	13	16	16	13	19	16	16	24	20	11	10

Au 15 juin, on constate que la fréquence de ciel clair n'est que de 19% contre 53 % pour un ciel moyen et 28% pour un ciel couvert. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant de constater qu'en Belgique, le rayonnement solaire est transmis à concurrence de 57% par la composante solaire diffuse. Cela signifie qu'en Belgique, plus de la moitié de l'énergie solaire reçue provient du rayonnement solaire diffus.

La transmissivité solaire d'un obstacle vaut :

- $T = 1$ s'il n'y a pas d'obstruction;
- $T = 0$ si l'obstacle est un bâtiment ou une paroi opaque;

- $0 < T < 1$ si l'obstacle est végétal. En général, on considère qu'un arbre à feuilles caduques transmet 15 à 30 % du rayonnement solaire direct en été et 55 à 70% en hiver, en fonction de la densité de ses branches et de son feuillage.

$$RS_{dif} = R_d \times SVF$$

Où R_d est le rayonnement solaire diffus mesuré sur un plan horizontal

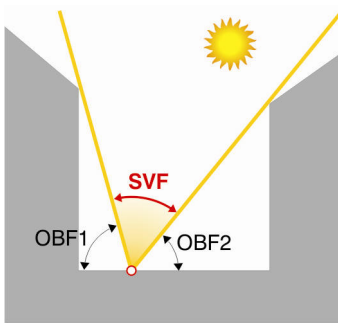
SVF est le facteur de vue du ciel (« sky view factor »)

Le facteur de vue du ciel est l'angle solide de vue du ciel depuis un espace urbain, c'est-à-dire une mesure de l'ouverture vers le ciel d'un espace public urbain. Le facteur de vue du ciel maximum possible entre une personne et le ciel est de 1. Ce cas n'existe que s'il n'y a aucun obstacle vertical au-dessus de l'horizon. Par contre, le SVF peut être pratiquement nul si une personne se trouve en-dessous d'un ensemble d'arbres denses ou l'avent d'un immeuble.

$$SVF = 1 - OBF$$

Où OBF est le facteur d'obstruction du ciel, c'est-à-dire la somme des facteurs d'obstruction de chaque obstacle, calculé suivant la formule :

$$OBF = \sum_{i=0}^n [(\text{angle d'obstruction}_{(i)} \text{ horizontal} / 360^\circ) \times (\text{angle d'obstruction}_{(i)} \text{ vertical} / 90^\circ)]$$



$$RS_o = \sum_{i=0}^n OBF_{(i)} \times [((R_v - R_d) \times T) + (R_d \times SVF)] \times A_{0(i)}$$

où $OBF_{(i)}$ est le facteur d'obstruction de l'obstacle i

R_v est le rayonnement solaire global reçu par un obstacle vertical i (en fonction de son orientation)

T est la transmissivité solaire entre le soleil et l'obstacle vertical analysé

$A_{0(i)}$ est l'albedo de l'obstacle i entre la personne et le ciel

$$OBF_{(i)} = [(\text{angle d'obstruction}_{(i)} \text{ horizontal} / 360^\circ) \times (\text{angle d'obstruction}_{(i)} \text{ vertical} / 90^\circ)]$$

T se calcule comme précédemment : $T = 1$ s'il n'y a pas d'obstruction; $T = 0$ si l'obstacle est un bâtiment ou une paroi opaque; $T = 0.15$ à 0.3 si l'obstacle est un arbre à feuilles caduques en été ou un arbre à feuilles persistantes toute l'année ; $T = 0.55$ à 0.7 si l'obstacle est un arbre à feuilles caduques en hiver.

Les valeurs moyennes horaires de R_v peuvent être trouvées dans les fichiers météorologiques.

Les tableaux ci-dessous donnent le rayonnement solaire global reçu par un obstacle vertical pour un ciel serein, un ciel moyen et un ciel couvert, à Uccle (Bruxelles), le

15 des mois de mars, juin, septembre et décembre, en fonction de l'orientation de l'obstacle étudié.

Mois	Heure	Rv par ciel serein - éclairage énergétique global W/m²			
		Verticale sud	Verticale nord	Verticale est	Verticale ouest
mars	7	25	355	109	23
	9	38	517	446	37
	11	47	248	688	55
	13	46	53	677	279
	15	37	36	418	524
	17	24	22	86	311
juin	5	190	406	26	25
	7	70	690	57	41
	9	62	590	313	54
	11	57	229	467	66
	13	58	62	446	326
	15	62	52	254	646
	17	125	37	47	654
19	164	22	22	291	
septembre	7	32	504	145	28
	9	45	540	471	44
	11	51	212	671	63
	13	50	56	633	337
	15	41	39	371	580
	17	28	23	65	383
décembre	9	22	225	293	23
	11	28	118	535	34
	13	27	29	486	185
	15	20	20	155	157

Mois	Heure	Rv par ciel moyen - éclairage énergétique global W/m²			
		Verticale sud	Verticale nord	Verticale est	Verticale ouest
mars	7	76	52	228	52
	9	268	116	352	116
	11	525	181	330	181
	13	475	157	157	216
	15	236	85	85	239
	17	49	15	15	125
juin	5	41	103	154	39
	7	117	146	356	103
	9	249	162	419	152
	11	381	185	319	187
	13	370	177	180	262
	15	233	135	131	347
	17	84	92	76	298
	19	4	6	4	10
septembre	7	86	67	196	60
	9	249	115	313	113
	11	445	148	280	156
	13	403	135	144	227
	15	213	90	89	248
	17	48	28	26	127
décembre	9	135	38	125	38
	11	356	78	151	78
	13	312	64	64	115
	15	6	3	3	5

Mois	Heure	Rv par ciel couvert - éclairage énergétique global W/m²			
		Verticale sud	Verticale nord	Verticale est	Verticale ouest
mars	7	38	32	83	32
	9	115	72	142	72
	11	210	111	150	111
	13	187	95	95	110
	15	92	51	51	93
	17	16	8	8	36
juin	5	25	35	44	25
	7	69	72	94	68
	9	114	106	130	105
	11	146	128	140	128
	13	138	120	121	128
	15	98	88	88	109
	17	49	50	48	76
	19	3	9	3	16
septembre	7	38	35	55	35
	9	84	70	91	70
	11	121	95	107	95
	13	111	86	86	94
	15	69	53	53	74
	17	19	14	13	40
décembre	9	39	20	37	20
	11	89	40	51	40
	13	76	33	33	40
	15	3	2	2	3

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour l'albédo de matériaux typiques de façades et du mobilier urbain.

Matériaux de façade ou de mobilier urbain	Albedo
Ardoise	0.11
Arbre à feuilles caduques	0.2 à 0.3
Double vitrage	0.13 à 0.22
Béton	0.2 à 0.45
Bois	0.15 à 0.4
Briques ordinaires rouges	0.23 à 0.32
Calcaire	0.5 à 0.65
Ciment (vieux de 1an)	0.29
Grès	0.27 à 0.46
Marbre	0.44 à 0.66
Granit (rougeâtre)	0.45
Métaux	0.08 à 0.85
Peintures ou matériaux non mentionnés : en fonction de la couleur	0.05 à 0.8
blanc	0.6 à 0.8
gris moyen	0.5 à 0.6
vert, rouge, brun moyen	0.3 à 0.5
brun, bleu foncé	0.2 à 0.3
noir	0.05 à 0.2

$$RSs = [(R-Rd) \times T] + (Rd \times SVF)] \times As$$

où A_s est l'albédo du sol

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs de l'albédo de revêtements de sol typiques.

Matériaux de sol	Albédo
Surface d'eau	0.03 à 0.1
Tas de feuilles et herbes coupées	0.05
Asphalte	0.07
Bois foncé (chêne,...)	0.05 à 0.1
Bois clair (pin,...)	0.1 à 0.2
Prairie	0.12 à 0.3
Sol sableux	0.15 à 0.4
Terre nue	0.2 à 0.25
Brique pourpre	0.23
Béton	0.3
Gazon	0.26 à 0.33
Neige	0.75 à 0.95

2.2/ RTab : Rayonnement terrestre absorbé

Le rayonnement terrestre est émis naturellement par tous les corps de notre planète, y compris l'atmosphère. C'est un rayonnement infrarouge, de grande longueur d'onde. La puissance rayonnée par un corps est fournie par la formule de Stefan-Boltzmann : $RT = E \times \sigma (Ts + 273.15)^4$

où σ est la constante universelle de rayonnement ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$), E est l'émissivité de ce corps et Ts est la température de surface du corps en °C.

L'émissivité E du corps traduit sa capacité à émettre un rayonnement énergétique. Pour une même température, le coefficient d'absorption et le coefficient d'émission d'un corps sont égaux. L'émissivité d'un corps est en grande partie dictée par la nature et l'état de sa surface. Elle tend vers l'unité pour les surfaces humides ou dont les irrégularités microscopiques facilitent l'émission; par contre, les matériaux finement polis ne présentant pas d'irrégularités de surface, comme par exemple les métaux, ont une émissivité faible.

Toute personne reçoit et absorbe le rayonnement terrestre provenant de tous les corps environnants. La surface du corps humain émet elle-même un rayonnement terrestre qui est fonction de sa température et de son émissivité.

Le flux de grande longueur d'onde provenant de l'atmosphère et des obstacles environnants (sol, murs, arbres,...) qui atteint une personne est supposé provenir à 50% de l'hémisphère supérieur (ciel et obstacles verticaux) et à 50% du sol.

$$RTabs = \{ [0.5 \times (RTc + RTo)] + (0.5 \times RTs) \} \times E$$

Où RTc est le rayonnement terrestre en provenance du ciel reçu par la personne

RTo est le rayonnement terrestre en provenance des objets (bâtiments, arbres,...) entre la personne et le ciel

RTs est le rayonnement terrestre de la surface du sol

E est l'émissivité d'une personne par rapport au rayonnement terrestre

L'émissivité d'une personne par rapport au rayonnement terrestre est égale à 0.98.

RTc = Rc x SVF

Où RTc est le rayonnement terrestre en provenance du ciel reçu par la personne
 Rc est le rayonnement terrestre émis par la totalité du ciel
 SVF est le facteur de vue du ciel

$$Rc = 0.5 \times N \times [(0.2 \times 1354) + (0.9 \text{ Es } \sigma (Ts + 273.15)^4)]$$

$$= 0.5 \times N \times [270.8 + (0.9 \text{ Es } \sigma (Ts + 273.15)^4)]$$

Où Ts est la température de surface du sol en °C
 Es est l'émissivité du sol
 σ est la constante universelle de rayonnement ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$)
 N est un facteur prenant en compte la nébulosité du ciel

Le rapport entre l'émissivité d'un ciel nuageux et l'émissivité d'un ciel serein peut être calculé à partir de l'expression suivante (Santamouris 2001) :

$$N = 1 + 0.0224n - 0.0035 n^2 + 0.00028 n^3$$

où n est la quantité totale de nuages opaques : n= 0 pour un ciel clair et n= 1 pour un ciel totalement couvert.

Nous proposons de simplifier l'évaluation de N en utilisant les valeurs suivantes :

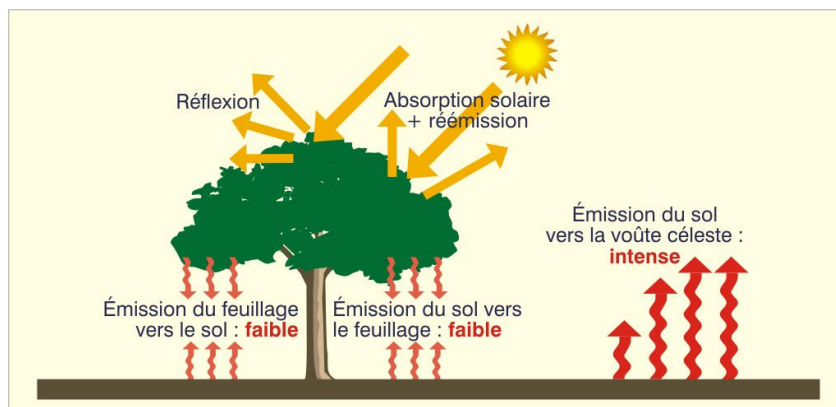
- N=1 pour un ciel clair,
- N=1.01 pour un ciel moyen,
- N=1.02 pour un ciel couvert.

Il est toutefois important de spécifier que l'équation Rc ci-dessus n'est valable que si la personne se trouve directement sous le ciel. Lorsqu'une protection solaire, une galerie, un arbre ou tout autre élément d'aménagement urbain se trouve entre la personne et le ciel, c'est cette surface qui doit être prise en compte dans l'évaluation du rayonnement terrestre émis par le « ciel ». Dans ce cas, il faut résoudre l'équation suivante :

$$Rc = [E_{sc} \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (T_{sc} + 273.15)^4]$$

Où Tsc est la température de surface (en °C) du matériau qui surplombe directement la personne
 Esc est l'émissivité de la surface qui surplombe directement la personne

La végétation à feuilles caduques, dont la température du feuillage reste basse grâce au processus d'évapotranspiration, sert donc d'ombrage efficace en été car elle réduit fortement le rayonnement solaire direct tout en émettant peu de rayonnement de grande longueur d'onde, contrairement aux auvents en toiles qui deviennent rapidement surchauffés. De plus, elle laisse le rayonnement solaire passer en hiver. Le schéma ci-dessous explique se comportement spécifique de la végétation par rapport au rayonnement solaire et terrestre.



$$RT_o = \sum_{i=0}^n [E_{o(i)} \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (T_{o(i)} + 273.15)^4] \times OBF_{(i)}$$

Où RT_o est le rayonnement terrestre en provenance des obstacles (bâtiments, arbres,...) entre la personne et le ciel

$T_{o(i)}$ est la température de surface d'un obstacle i en °C

$E_{o(i)}$ est l'émissivité de l'obstacle i

OBF est le facteur d'obstruction de l'obstacle i

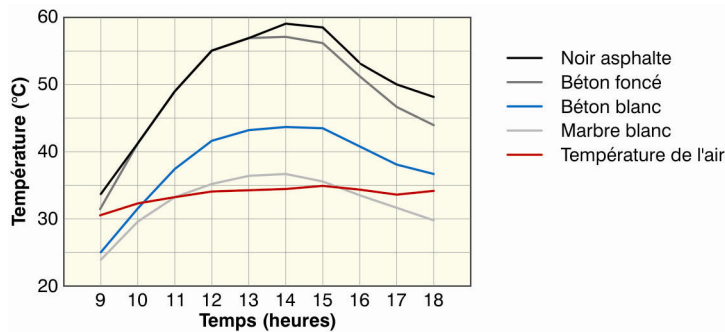
$$RT_s = [E_s \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (T_s + 273.15)^4]$$

Où T_s est la température de surface du sol en °C

E_s est l'émissivité du sol

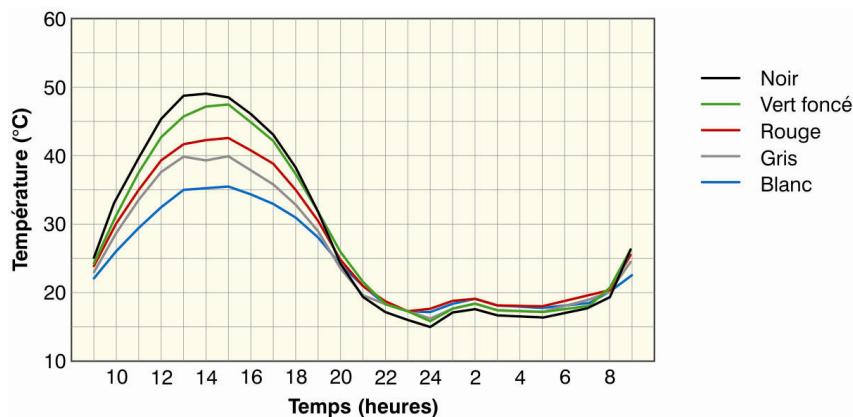
La couleur et la nature des matériaux utilisés pour l'enveloppe extérieure des bâtiments ont un rôle important par rapport à leur équilibre thermique. Les couleurs claires associées à un albédo élevé diminuent le rayonnement solaire stocké et donc la température de surface d'une paroi tandis qu'une émissivité élevée augmente les pertes par rayonnement infrarouge vers le ciel. L'impact des caractéristiques des matériaux sur leurs températures de surface est élevé.

Le graphe ci-dessous montre la distribution des températures de surface de différents matériaux en fonction de mesures expérimentales réalisées à Athènes durant le mois d'août 2001 (Doulos & al. 2004). On voit que l'albédo des matériaux influence fortement leur température de surface, qui évolue tout au long de la journée et dépasse très largement la température de l'air en milieu de journée.



(Doulos & al. 2004).

Le graphe suivant représente la distribution horaire des températures de surfaces pour des matériaux de couleurs différentes selon une étude expérimentale réalisée à Athènes en août 2001 (Doulos & al. 2004).



(Doulos & al. 2004).

Il est important de constater que de fortes différences sont perceptibles pendant la journée avec un maximum vers 14h alors que les différences de températures de surface deviennent assez faibles durant la nuit. Cette différence entre le jour et la nuit provient du fait que l'émissivité des matériaux (assez constante pour l'ensemble des matériaux de construction) influence leur équilibre thermique pendant la nuit en affectant son émissivité alors que la couleur des surfaces détermine davantage l'équilibre thermique journalier en affectant son albédo. L'émissivité d'un corps est indépendante de sa couleur dans les conditions ambiantes habituelles.

Quelques soient les écarts de température de surface d'un matériau pendant la journée, la température des surfaces pendant la nuit est généralement quasiment constante. Notons également que l'influence de l'albédo des matériaux sur leur température de surface est faible par ciel couvert ou lorsque la surface est ombragée.

Dans la majorité des cas, le coefficient d'émissivité des matériaux de construction est supérieur à 0.8. Les métaux sont les seuls matériaux de construction qui ont une émissivité faible. Voici quelques exemples du facteur d'émissivité de différents matériaux dans les conditions ambiantes habituelles.

Matériaux	Emissivité
Corps humain	0.98
glace	0.97
eau	0.96
neige fraîche	0.95
Verre	0.94
Brique	0.93
Béton	0.92
Sable	0.9
Acier	0.2 à 0.3
Aluminium	0.09

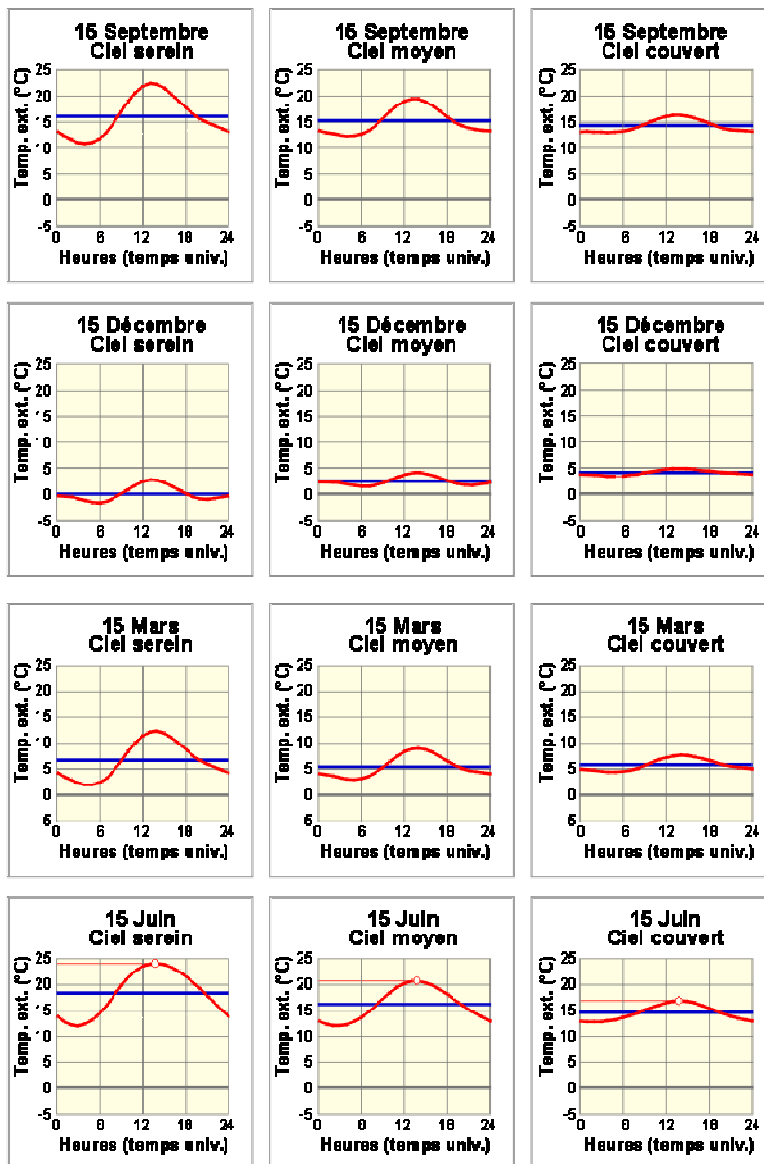
A partir de ces constats et des études réalisées dans le cadre du projet RUROS sur la température moyenne radiante (Scudo & al. 2004), nous proposons d'utiliser la simplification suivante en première approximation pour déterminer les températures de surface des matériaux dans les espaces publics urbains en Belgique :

- Pour une vitesse du vent inférieure à 2 m/s, la température de surface de matériaux de construction pendant la soirée et la nuit et leur température de jour lorsque ces surfaces sont ombragées tout au long de la journée vaut **$T_s = T_a - 6$ [°C]**
- Pour une vitesse du vent inférieure à 2 m/s et des surfaces exposées au soleil, la température de surface d'un matériau de construction dépend de l'albédo de ce matériau :
 $T_s = T_a + 7$ [°C] si $A = 0.8$
 $T_s = T_a + 12$ [°C] si $A = 0.2$
 $T_s = T_a + 17$ [°C] si $A = 0.07$
- Pour toute surface exposée à un ciel couvert mais sous un vent inférieur à 2m/s, **$T_s = T_a$**
- Pour toute surface, ensoleillée ou non, exposée à un vent supérieur ou égal à 2 m/s, **$T_s = T_a$**
- Pour toute surface végétale (arbres, haies,...) et pour les surfaces d'eau (bassins, fontaines, ...), **$T_s = T_a$**

Où T_a est la température ambiante de l'air.

Pour le rayonnement thermique asymétrique, le confort des personnes semble affecté par la présence d'une différence de températures de surfaces de rayonnement de plus de 20°C. Ce détail peut par exemple être perçu en extérieur en pays chaud sous une protection solaire formée par une toile simple... (Ashrae 2001).

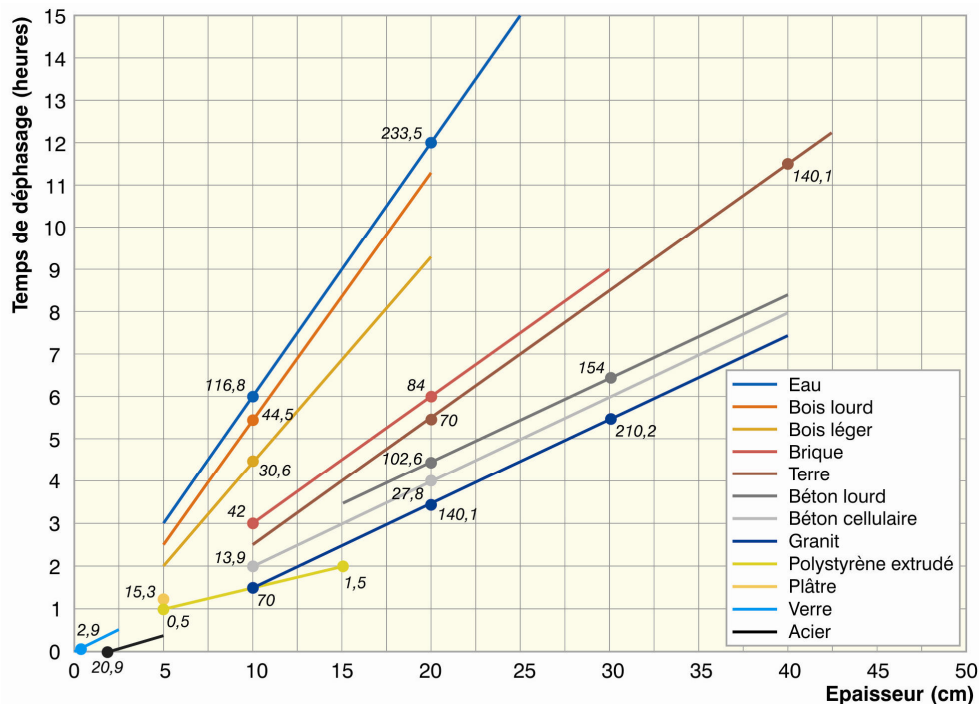
Pour évaluer précisément la température ambiante, nous donnons dans la suite de cette thèse un algorithme pour approcher approximativement la température de l'air en milieu urbain en fonction de différents paramètres tels que la densité urbaine, la saison et le moment de la journée, la végétation,... En première approximation, on peut toutefois estimer que la température ambiante est celle donnée par la station météorologique. Le régime des températures extérieures est variable : son évolution est assimilable à une sinusoïde dont l'axe représente la température moyenne journalière. Les graphes ci-dessous donnent l'évolution de la température extérieure moyenne par ciel serein, par ciel moyen et par ciel couvert, le 15 des mois de mars, juin, septembre et décembre, à la station météorologique de Uccle (Bruxelles).



Bien entendu pour un calcul très détaillé d'une température de surface à un moment précis, il serait nécessaire de tenir compte de la dynamique thermique des matériaux. Il serait alors nécessaire d'évaluer cette température de surface en fonction non seulement de son albédo et des conditions météorologiques d'ensoleillement et de vent au moment considéré mais aussi en fonction de son inertie thermique. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces calculs trop sophistiqués pour évaluer globalement le confort thermique d'une personne à l'extérieur. Nous nous contenterons de donner quelques pistes de réflexion par rapport au choix des matériaux.

L'inertie des matériaux influence la température de surface des parois en améliorant ou en entravant le stockage de la chaleur. L'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et la restitution de celle-ci avec un déphasage temporel.

L'énergie solaire est par essence variable dans le temps. La présence d'une grande inertie thermique permet d'amortir l'impact de ces fluctuations solaires, de «lisser» la courbe des températures. De plus, une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. L'idéal est dans ce cas une inertie thermique dont le temps de déphasage est de 12 heures. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante. Le graphe ci-dessous indique le temps de déphasage de l'inertie thermique de quelques matériaux pour des épaisseurs usuelles d'utilisation. Ces résultats proviennent de simulations réalisées sous climat chaud pour une paroi orientée au sud.



Outre le choix de l'épaisseur du matériau pour déterminer le temps de déphasage de l'inertie thermique, il est important de tenir compte du choix du matériau qui détermine l'amplitude de son inertie.

Un matériau est considéré comme ayant une grande inertie thermique s'il a une capacité thermique élevée. La capacité thermique des matériaux est la caractéristique qui influence la quantité d'énergie thermique qui peut être stockée dans le matériau. Elle est surtout liée à la masse du matériau : une masse volumique élevée indique un matériau à forte capacité thermique. Ainsi, les matériaux lourds, comme le béton par exemple, accumulent globalement plus de chaleur que les matériaux légers. Le tableau ci-dessous donne la capacité thermique d'une paroi homogène de 20cm en fonction du type de matériau choisi.

Matériau	Capacité thermique (MJ/m²)
Acier	7.4
Pierre bleue	4.5
Bassin d'eau	3.5
Béton lourd	3.2
Verre	2.1
Terre cuite	1.8
Béton léger	0.8
Bois massif	0.7
Air immobile	0.001

Une autre caractéristique importante des matériaux pour le confort des personnes est son effusivité thermique, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut fournir au matériau pour élever sa température. Cette caractéristique est aussi connue sous le nom de coefficient de contact car elle est aussi responsable de la sensation chaude ou froide au toucher, ce qui est essentiel pour les matériaux utilisés dans l'aménagement d'un espace public de repos. Le bois est par exemple réputé pour conserver une sensation de chaleur agréable quelques soient les conditions de température et de rayonnement alors que le béton et encore davantage l'acier dont la capacité thermique est plus élevée sont nettement plus froids ou nettement plus chauds en fonction des conditions météorologiques auxquelles ils ont été soumis.

Matériau	Effusivité thermique (J/m³Ks^{0.5})
Acier	11700
Pierre bleue	2803
Béton lourd	1691
Bassin d'eau	1556
Verre	1369
Terre cuite	831
Béton léger	383
Bois massif	350
Air immobile	5

La comparaison de la capacité thermique et de l'effusivité thermique des mêmes matériaux montre que globalement un matériau qui a une capacité thermique élevée a aussi une effusivité haute alors qu'un matériau dont la capacité thermique est faible a une effusivité basse.

Pour une première évaluation du comportement thermique des matériaux, l'albédo et la capacité thermique sont donc les caractéristiques essentielles. Les matériaux dont la température de surface reste fraîche sous un rayonnement solaire direct sont ceux qui possèdent une couleur claire et une forte capacité thermique, tandis que les matériaux dont la température de surface s'accroît rapidement quand ils sont exposés au soleil sont ceux qui possèdent une couleur sombre et une capacité thermique faible.

Pour limiter les surchauffes en été, il vaut mieux favoriser des matériaux dont la capacité thermique est forte et l'albédo élevé là où le soleil frappe directement c'est-à-dire essentiellement les façades sud et le sol. Ainsi, dans les pays chauds, nous recommandons l'utilisation de la pierre, du béton ou de tout autre matériau présentant une masse volumique importante, peint en blanc ou de couleur claire.



(Littlefair & al. 2000).

Par contre, si on désire qu'une surface se réchauffe rapidement dès qu'elle est ensoleillée et qu'elle conserve une sensation de chaleur au toucher même lorsque les températures sont basses, une capacité thermique et un albédo faibles sont à privilégier. C'est la raison pour laquelle en Belgique l'utilisation du bois dans les espaces publics de détente favorise le confort des personnes. Les photos ci-dessous représentent la place des Sciences à Louvain-la-Neuve, où le choix du bois comme matériau non seulement pour les bancs mais aussi pour le sol de la place invite les utilisateurs de l'espace à s'asseoir par terre et à s'appropriier l'espace comme ils le désirent, dès que le ciel est serein.



(Photos : S. Reiter)

3/ Conv : perte ou gain de chaleur par convection

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface et un fluide (généralement l'air) par mise en mouvement de ce fluide. Les mouvements d'air peuvent être générés par une différence de températures entre l'air et la surface ou par des différences de pression (vent, courant d'air créé par le trafic, ...).

Expérimentalement, il est impossible de maintenir l'air parfaitement immobile au contact d'une surface à température différente. Il se crée, au voisinage de la surface, des petits mouvements d'air générant la convection naturelle. En l'absence de toute ventilation, les échanges énergétiques par convection d'une surface avec l'air dépendent de la position (verticale ou horizontale) de cette surface et de la différence de température entre celle-ci et l'air ambiant.

S'il s'agit d'une convection forcée, c'est-à-dire que le renouvellement de l'air au contact de la surface est provoqué par une force extérieure (le vent ou le trafic automobile par exemple), le paramètre déterminant devient la vitesse de l'air. Les échanges convectifs sont fortement accrus lorsqu'on passe de la convection naturelle à la convection forcée.

La puissance échangée par convection est égale à $hc \times (T_s - T_a)$, où hc est le coefficient de convection, T_s la température de la surface et T_a la température ambiante de l'air.

Cependant, dans l'évaluation de la convection autour d'une personne, il faut tenir compte du fait que l'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface du corps humain et l'air. L'influence de la convection sur le bilan thermique du corps humain à l'extérieur s'écrit donc :

$$\text{Conv} = hc \times (T_c - T_a) / R$$

Où hc est le coefficient de convection

T_c est la température du corps humain (°C)

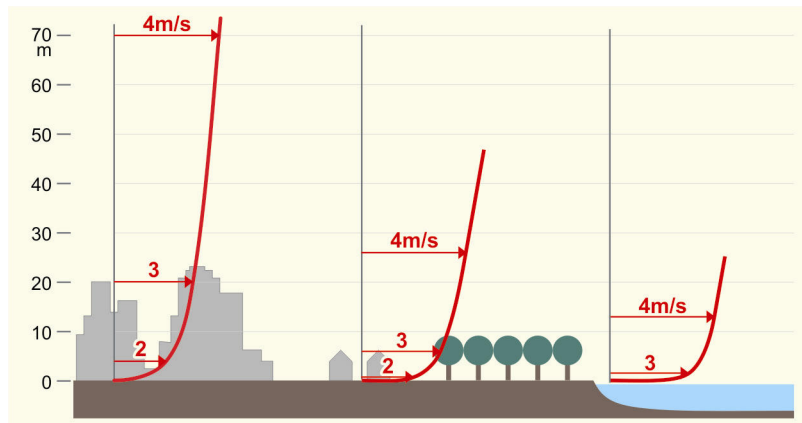
T_a est la température de l'air (°C)

R est la résistance thermique entre le corps et l'air.

Le coefficient de convection à utiliser dépend de la vitesse de l'air en fonction des formules suivantes établies pour une personne debout (ASHRAE 2001) :

- Pour une vitesse de l'air comprise entre 0 et 0.15 m/s, $hc = 4$
 - Pour une vitesse de l'air supérieure à 0.15 m/s, $hc = 14.8 V^{0.69}$
- Où V est la vitesse de l'air en m/s.

De manière générale, le vent étant freiné par les obstacles, lorsque la densité et la taille de ceux-ci sont importantes, ce qui est le cas en ville, la vitesse du vent est moindre qu'en site dégagé. Notons également que la vitesse du vent, nulle au niveau du sol, augmente avec la hauteur : c'est ce qui explique que les vitesses du vent au sommet d'un immeuble tour sont nettement plus élevées qu'au niveau du toit d'une maison qui ne comporte qu'un étage. Le graphe ci-dessous montre schématiquement l'évolution du profil du vent en fonction de la nature du sol.



La vitesse de l'air doit être prise dans l'espace public considéré au niveau des piétons (par exemple à 1.5m de haut), alors que les données météorologiques donnent les vitesses de l'air à 10 m de haut dans un environnement totalement dégagé. L'évaluation précise de la vitesse de l'air en milieu urbain au niveau des piétons peut être réalisée à l'aide des outils graphiques développés dans ce doctorat dans les chapitres ultérieurs.

D'après nos calculs dans Excel à partir de l'année météorologique type établie pour Uccle (Bruxelles), nous avons déterminé le tableau suivant donnant les fréquences et les vitesses moyennes du vent (à la station météorologique à 10m de haut) en fonction des 12 secteurs d'orientation du vent.

Orientation	Angle	fréquence (%)	Vitesse (m/s)	
NNE	15-44		3,5	3,29
NEE	45-74		8,7	4,06
E	75-104		2,4	2,62
EES	105-134		2,1	2,78
ESS	135-164		7,5	3,61
S	165-194		8,5	3,67
SSO	195-224		14	4,13
SOO	225-254		28	4,02
O	255-284		8,7	3,74
OON	285-314		4,2	4,61
ONN	315-344		7,7	3,58
N	345-14		4,7	3,33
Moyenne totale				3.83

On voit donc que les vents allant du SSO au SOO, c'est-à-dire ayant un angle compris entre 195° et 254° par rapport au Nord, soufflent à une fréquence de 42% du temps. Il s'agit bien du vent dominant en Belgique.

Une règle approximative pour évaluer les vitesses du vent est décrite ci-dessous. Cette formule et ce tableau permettent de déterminer la vitesse du vent (U) en fonction du type de terrain (paramètres K et a) et de sa hauteur d'évaluation (Z) ainsi que de la vitesse du vent à la station météorologique la plus proche (U_{10,météo}).

$$U = K z^a U_{10m,météo}$$

Terrain	K	α	Z ₀	d
Mer	0.7	0.14	0.005	0
Station météo ; terrain totalement dégagé	0.68	0.17	0.03	0
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2	0.1	0.7h
Tissu suburbain	0.4	0.235	0.5	0.8h
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25	1	0.8h
Centre-ville très dense avec bâtiments très irréguliers	0.21	0.33	2.5	0.8h

$$T_c = 36.5 + (0.0043 \times M)$$

Où M est l'énergie métabolique (W/m²)

$$R = (R_t + 0.155 R_a + 0.155 R_v)$$

Où R_t = résistance de la peau au transfert de chaleur = 65 - 0.1 M

Où M est l'énergie métabolique (W/m²)

R_a = résistance de la couche d'air autour du corps en Clo

R_v = résistance des vêtements en Clo

L'unité de mesure Clo mesure l'isolation thermique selon la formule :

$$1\text{Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$$

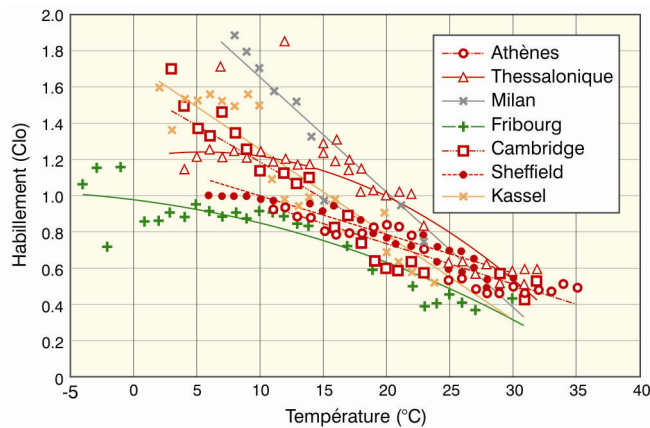
La valeur de Ra peut être évaluée à partir de la vitesse de l'air V (m/s). L'isolation de la couche d'air extérieure en unité de Clo dépend de la vitesse de l'air selon le tableau ci-dessous (Geiger 1980)

V (m/sec)	0.15	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	5
Ra (Clo)	0.85	0.7	0.54	0.455	0.35	0.31	0.28	0.26	0.2

Le tableau ci-dessous permet d'avoir une correspondance établie à partir de la norme ISO 1993 entre différents types d'habillement et leur résistance thermique (Rv) en Clo.

Tenue vestimentaire	Clo
Nu, debout	0
Maillot de bain	0.1
Tenue tropicale : slip, chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0.3
Tenue d'été : slip, chemise courte à col ouvert, pantalon long léger ou jupe, chaussettes légères et chaussures	0.5
Tenue de travail légère : sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalon long, chaussettes légères et chaussures	0.7
Tenue d'intérieur pour l'hiver : sous-vêtements, chemise à manches longues, pantalon long ou robe, chaussettes et chaussures	1
Tenue d'extérieur pour l'hiver : sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise à manches longues, pantalon et gilet ou robe chaude, veste, chaussettes épaisses et chaussures	1.5
Tenue d'hiver pour grand froid en fourrure	3

La valeur Rv moyenne des piétons dépend du climat. Le graphe ci-dessous donne la variation moyenne de l'habillement en Clo en fonction de la température moyenne de l'air dans différentes villes européennes (Nikolopoulou & Lykoudis 2006).



(Nikolopoulou & Lykoudis 2005).

Pour la Belgique, en milieu urbain, nous proposons d'utiliser les critères suivants :

- si Tair entre -5 et 12°C, Rv = 1.5 Clo,
- si Tair entre 12 et 18°C, Rv = 1 Clo,
- si Tair entre 18 et 24°C, Rv = 0.75 Clo
- si Tair entre 24 et 36°C, Rv = 0.5 Clo.

Il faut toutefois noter que les valeurs d'isolation thermique des vêtements varient en réalité avec la vitesse de l'air et avec le mouvement des personnes. Les valeurs données ci-dessus sont des valeurs pour des personnes immobiles et une vitesse de l'air inférieure à 0.2m/s (Havenith & al. 2002). Elles devraient suffire pour une évaluation approximative du bilan thermique d'une personne.

Evap : perte de chaleur par évaporation

En ambiance chaude, les échanges thermiques du corps avec son environnement ont lieu principalement par évaporation à la surface de la peau. Vu que l'air ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau, une ambiance chaude et sèche est plus facile à supporter pour le corps qu'une ambiance chaude et humide. Cependant, l'humidité a peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu lorsqu'elle est comprise dans la gamme des valeurs entre 30 et 70%, quelque soit la température de l'air. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans un espace ouvert ou fermé.

L'humidité est un facteur déterminant dans les climats à haute température. Dans nos régions, la température peu élevée rend l'homme relativement insensible à l'humidité pour autant qu'elle n'atteigne pas la saturation (humidité relative = 100%).

La formule ci-dessous est une formule simplifiée pour ne pas tenir compte de la résistance des vêtements au transfert de chaleur par évaporation et de la vitesse de sudation du corps humain, qui sont des paramètres difficiles à évaluer et qui alourdiraient trop notre calcul. Il ne nous semble pas indispensable dans le cadre d'un climat tempéré froid d'entrer dans une telle précision par rapport aux pertes par évaporation.

Evap= he (Pc – Pa)

Où he est le coefficient d'évaporation, qui dépend de la vitesse du vent et donc de hc (le coefficient de convection).

Pc est la pression de vapeur d'eau sur la peau humaine en kPa

Pa est la pression de vapeur d'eau de l'air en kPa

$h_e = 15 h_c [W m^{-2} kPa^{-1}]$

Le tableau ci-dessous donne la pression de vapeur saturée d'une ambiance à une température donnée. La pression de vapeur de l'air vaut sa pression de vapeur saturée multipliée par son humidité relative. Si T = 21°C et HR = 70%, la pression de vapeur saturée vaut 2.487 Pa et la pression de vapeur de l'air vaut 0,7 * 2.487 = 1.741 Pa. La pression de vapeur d'eau sur la peau humaine est la pression de vapeur d'eau pour une ambiance qui serait à la température du corps humain (Tc) et dont l'humidité relative serait égale à celle de l'air ambiant.

T [°C]	p _{vs} [Pa]	T [°C]	p _{vs} [Pa]	T [°C]	p _{vs} [Pa]
0	611	10	1 228	20	2 340
1	657	11	1 313	21	2 487
2	705	12	1 403	22	2 645
3	759	13	1 498	23	2 810
4	813	14	1 599	24	2 985
5	872	15	1 706	25	3 169

6	935	16	1 818	26	3 362
7	1 002	17	1 938	27	3 565
8	1 073	18	2 065	28	3 781
9	1 148	19	2 197	29	4 006

Table des pressions de vapeur maximales p_{vs}

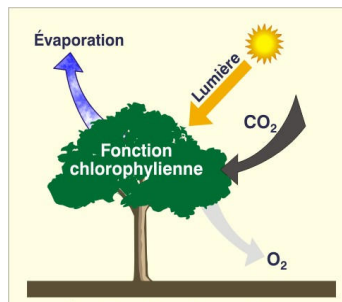
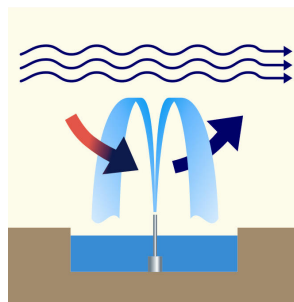
L'humidité relative, à une température quelconque, est le rapport entre l'humidité absolue de l'air divisée par la capacité maximale en humidité de l'air à cette température. Du point de vue physiologique, la pression de vapeur de l'air est la manière la plus appropriée de définir les conditions d'humidité parce que la vitesse d'évaporation du corps est proportionnelle à la différence de pression de vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant. Par contre, l'humidité relative affecte le comportement de beaucoup de matériaux de construction et leur vitesse de détérioration. (Geiger 1980)

L'humidité relative de l'air est élevée en Belgique et varie en moyenne de 59% à 91% tout au long de l'année. Le tableau ci-après donne pour Uccle, pour différentes heures de la journée, les moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air (De Herde 1994).

Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	87	86	82	81	81	82	84	86	86	88	88	89
3	88	88	84	84	85	86	87	89	89	89	89	89
6	89	89	87	87	84	85	88	90	91	91	90	90
9	89	87	81	76	71	72	75	78	80	85	88	89
12	84	80	71	65	61	63	66	67	69	75	81	84
15	83	76	67	60	59	61	63	65	66	73	81	85
18	86	82	75	66	64	65	69	71	77	84	86	88
21	87	84	79	74	74	75	79	81	83	87	88	89

Vu que ce calcul des pertes par évaporation est assez limité dans notre méthode, ajoutons les règles de conception suivantes :

- dans les pays chauds et humides, il faut favoriser la ventilation naturelle des espaces publics.
- dans les pays chauds et secs, il est utile d'humidifier l'air (fontaines, végétation,...)



- dans les pays à fortes précipitations, toutes les protections contre la pluie sont à valoriser : auvents, galeries,... Ainsi, en Belgique, les auvents et galeries sont toujours bienvenus pour nous protéger des intempéries.



(Photo : S. Reiter).

TRe : rayonnement terrestre émis

$$TRe = E \times 5.67 \times 10^{-8} \times (Ts + 273.15)^4$$

E est l'émissivité de la personne (en général 0.98)

Ts est la température de surface de la personne.

$$Ts = Ta + [Ra \times (Tc - Ta) / R]$$

Où R est la résistance thermique totale entre le corps et l'air.

Ra est résistance de la couche d'air autour du corps en Clo

Tc est la température du corps = $36.5 + (0.0043 \times M)$

Où M est l'énergie métabolique (W/m²)

Ta est la température ambiante

Les formules et valeurs suivantes ont déjà été développées lors de l'évaluation de la convection mais sont données en rappel.

$$R = (Rt + 0.155 Ra + 0.155 Rv)$$

Où Rt = résistance de la peau au transfert de chaleur = $65 - 0.1 M$

Où M est l'énergie métabolique (W/m²)

Ra est résistance de la couche d'air autour du corps en Clo

Rv = résistance des vêtements en Clo

Le tableau ci-dessous donne la valeur de Ra en fonction de la vitesse du vent (Geiger 1980) :

V (m/sec)	0.15	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	5
Ra (Clo)	0.85	0.7	0.54	0.455	0.35	0.31	0.28	0.26	0.2

Pour la Belgique, les valeurs de Rv choisies dépendent de la température de l'air :

- si Tair entre -5 et 12°C, Rv = 1.5 Clo,
- si Tair entre 12 et 18°C, Rv = 1 Clo,
- si Tair entre 18 et 24°C, Rv = 0.75 Clo
- si Tair entre 24 et 36°C, Rv = 0.5 Clo.

Ainsi, le bilan d'énergie d'une personne peut être finalement calculé en additionnant les différentes composantes analysées en détail dans les pages précédentes.

$$\text{Bilan} = M + \text{Rabs} - \text{Cond} - \text{Conv} - \text{Evap} - \text{Re}$$

où M est l'énergie métabolique du corps humain

Rabs est le rayonnement (solaire et terrestre) absorbé

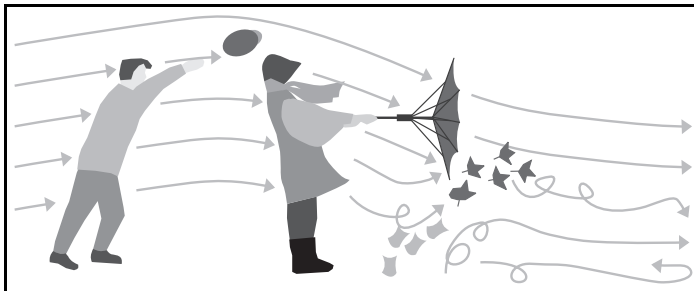
Cond est la perte (ou le gain) de chaleur par conduction

Conv est la perte (ou le gain) de chaleur par convection
 Evap est la perte de chaleur par évaporation
 Re est le rayonnement terrestre émis par le corps humain

Cette valeur quantitative du bilan thermique d'une personne à l'extérieur peut alors être évaluée en terme de confort en la comparant aux limites définies dans la méthode COMFA (Brown & Gillespie 1995).

Cette méthode bien qu'elle soit basée sur des approximations nous semble suffisamment précise. Elle est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'évaluer l'influence des interactions entre paramètres climatiques sur le confort thermique humain. Par exemple, au cours d'une journée ensoleillée et peu venteuse en hiver, le rayonnement terrestre moyen a la même importance que la température et son importance est encore supérieure en été. Par contre, pour un environnement venteux, la température de l'air a nettement plus d'importance que le rayonnement terrestre parce que les échanges par convection dominent lorsque le vent souffle. Cette méthode de calcul pourrait aussi être programmée dans Excel pour offrir une évaluation du confort quantitatif à l'extérieur permettant de jouer sur les différents paramètres urbanistiques ainsi que sur les données météorologiques d'entrée. Le calcul séparé de chacune des valeurs intervenant dans le bilan énergétique permet de trouver aisément quel est le point crucial à améliorer s'il y a lieu.

2.3.2 Les critères quantitatifs du confort par rapport au vent



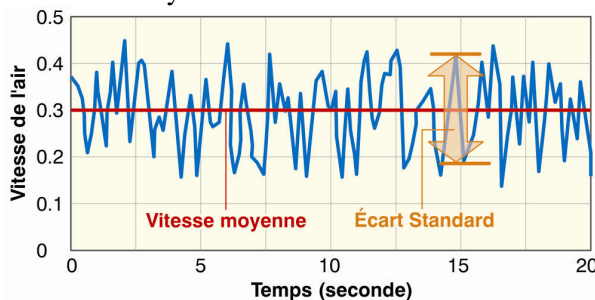
Le vent est le mouvement horizontal de l'air qui tend à équilibrer les zones de pression différente dans l'atmosphère. A faible hauteur (dans les 500 premiers mètres), il présente une turbulence importante. Ainsi, en un point donné, la vitesse du vent va fluctuer en grandeur et en direction.

La vitesse instantanée du vent à la hauteur z peut s'exprimer sous la forme de la somme de deux termes:

$$V_z(t) = V_z + V_z'(t)$$

Où V_z est la vitesse moyenne sur une période T

$V_z'(t)$ est la fluctuation de la vitesse au temps t par rapport à la vitesse moyenne. Cette valeur est variable avec le temps.



(Roulet 2002).

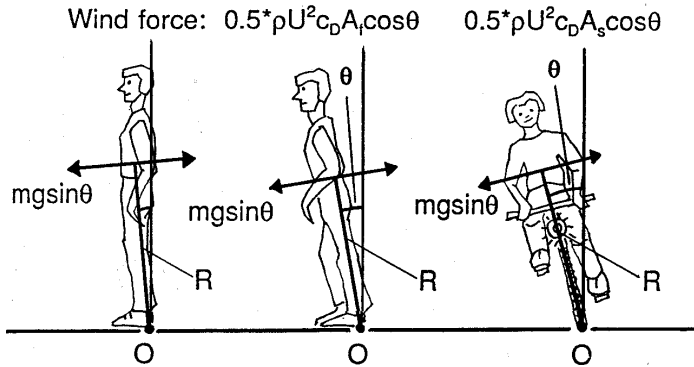
Le confort des piétons est affecté par la vitesse du vent et par sa variabilité dans le temps et dans l'espace. Les échanges thermiques entre l'homme et son environnement sont aussi affectés par le vent. Enfin, le vent exerce une influence indirecte sur le confort des piétons par la dispersion des polluants.

Ce chapitre étudie les effets mécaniques du vent sur les piétons. Les problèmes de confort thermique lié au vent sont traités dans la section sur le confort thermique en zone extérieure (2.3.1). L'influence du vent sur le confort respiratoire est traitée au point suivant (2.3.3).

Les effets observables de **la vitesse moyenne du vent** ont été classifiés par l'Amiral Sir Francis Beaufort, en 1806, pour fournir un moyen d'estimer les conditions de vent en mer. Cette échelle de la force du vent est toujours d'usage à l'heure actuelle. Penwarden a converti cette échelle pour évaluer le vent sur terre au niveau piéton (Penwarden 1973). Le tableau ci-dessous reprend cette « échelle de Beaufort » adaptée par Penwarden qui permet de classifier les types de vent en fonction de leur vitesse à 10m du sol. Nous y avons ajouté les vitesses du vent correspondant à une hauteur de 1.5m, car c'est la hauteur idéale pour mesurer l'effet mécanique du vent sur les piétons.

Type de vent	Nombre de Beaufort	V à 10m (m/s)	V à 1.5 m (m/s)	Effets mécaniques du vent au niveau des piétons
Calme	0	0 à 0.3	0 - 0.28	Calme
Air léger	1	0.4 à 1.5	0.28 à 1.11	La direction du vent est perçue par inclinaison de la fumée
Brise légère	2	1.6 à 3.3	1.11 à 2.5	Le vent est ressenti sur le visage. Les feuilles bruissent.
Brise douce	3	3.4 à 5.4	2.5 à 4.2	Les feuilles sont en mouvement permanent. Le vent étend des drapeaux légers, les cheveux sont dérangés, les vêtements amples claquent au vent.
Brise modérée	4	5.5 à 7.9	4.2 à 6.1	La poussière et les papiers perdus se soulèvent ; les cheveux sont décoiffés, les branches des arbres bougent.
Brise fraîche	5	8.0 à 10.7	6.1 à 8.3	La force du vent est ressentie par le corps. C'est la limite de la possibilité de trouver le vent agréable : marche légèrement perturbée, neige qui s'envole, petits arbres qui plient,...
Brise forte	6	10.8 à 13.8	8.3 à 10.6	Il est difficile de marcher droit, les parapluies sont utilisés avec difficulté, les cheveux volent tout droit, le bruit du vent est désagréable aux oreilles, la neige est emportée au-dessus des têtes (=blizzard), les grandes branches des arbres sont en mouvement.
Vent modéré	7	13.9-17.1	10.6-13.3	Marcher est inconfortable. Tous les arbres plient.
Vent fort	8	17.2-20.7	13.3-16.1	Augmentation générale des causes d'inconfort. Progression pédestre difficile et dangereuse ; difficulté de garder l'équilibre sous les rafales. Les branches des arbres se cassent.
Tempête	9	20.8-24.4	16.1-18.9	Risque réel d'être violemment projeté à terre sous l'effet des rafales de vent

Le schéma ci-dessous montre la force exercée par le vent sur un piéton et un cycliste. Il est utile de retenir que la force exercée sur un piéton ou un cycliste s'accroît avec le carré de la vitesse du vent. Donc, lorsque la vitesse du vent est doublée, la force exercée sur une personne est quadruplée, tripler la vitesse du vent augmente sa force par neuf, etc.



(Bottema 1993)

Pour les cyclistes, des vents de tête de 5 m/s limitent la progression; les vélos ne peuvent plus continuer à rouler lorsque le vent dépasse 10m/s. (Bottema 1993)

Cette introduction sur les effets mécaniques du vent suggère que l'inconfort commence à une vitesse moyenne de 5m/s, avec le soulèvement de la poussière, les papiers qui s'envolent, les vêtements et les cheveux qui claquent. Les vitesses de vent de 8 à 10m/s exercent une force importante sur le corps humain et sont à éviter. Enfin des vitesses de 15 à 20 m/s ou plus présentent de réels risques de danger.

Pour les places et les espaces publics de rencontre, il est donc conseillé que la vitesse du vent reste la plupart du temps inférieure à 5m/s. Cette limite de la vitesse du vent dans les espaces publics a été reconnue par la ville de San Francisco, où une législation impose aux nouveaux bâtiments qu'ils soient construits de telle manière que le vent soit limité à 5m/s au niveau du sol, pendant 90% des heures du jour, dans les zones extérieures publiques de détente (Bosselmann et al. 1988).

En Belgique, les moyennes annuelles de la vitesse du vent mesurées à environ 10m de hauteur sont comprises entre 7m/s dans la zone maritime proche du littoral, 3.8 m/s à Uccle (Bruxelles) et 3m/s dans certaines parties de la Campine limbourgeoise et de la Gaume ainsi que dans la vallée de la Meuse en aval de Liège (Malet 1989). A la Côte, la vitesse du vent est donc nettement plus élevée que dans le reste du pays.

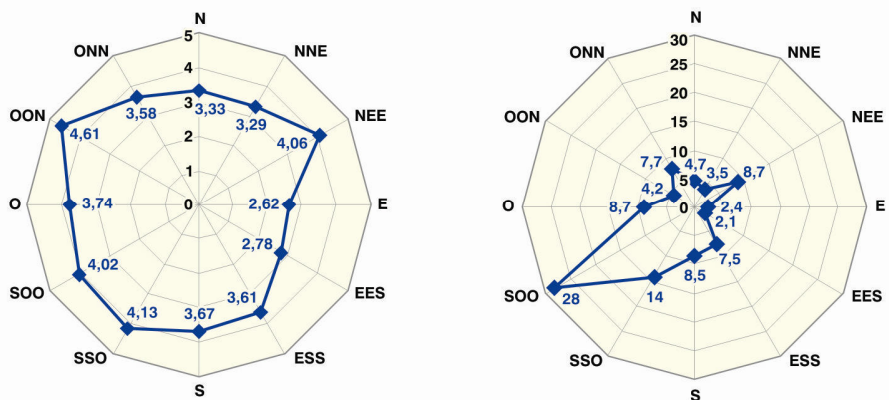
Le tableau ci-dessous donne les fréquences du vent correspondant à six intervalles de vitesses de l'air pour chaque mois, toutes directions confondues à Uccle (Bodeux 1977).

V (m/s)	Fréquence du vent (%)											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0 à 2.5	27.7	30.7	30.5	31.3	40.8	45.0	49.9	46.4	50.3	43.8	36.8	29.7
2.51 à 5.5	33.3	34.1	36	38.1	41.1	41	37.9	38.4	37.6	35.2	34.7	32.5
5.51 à 8	24	20.9	20.1	21.8	14.9	11.5	10.2	12.2	10.2	11.5	18.6	22.8
8.01 à 11	10	9.5	0.9	6.7	2.8	2.1	1.7	2.5	1.4	4.1	6.7	10.2
11.01 à 14	3.6	3.4	3.3	1.8	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	1.2	2.6	3.6
>14	1.3	1.3	1.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0.4	1.2

Les fréquences de vents dont la vitesse est supérieure à 5m/s représentent donc un pourcentage relativement élevé du temps en hiver. Pour les mois de décembre, janvier et février réunis, les vents dont la vitesse est supérieure à 5m/s soufflent pendant 37.3% du temps. Ils sont d'une fréquence de 24.7% en mars-avril-mai, de 19% en septembre-octobre-novembre et de 13.7 % en juin-juillet-août.

Par ailleurs, les vitesses de vent inférieures à 2.5 m/s à 10m de haut sont également fort présentes puisqu'elles ont une fréquence minimale de 27.7% en janvier et une fréquence maximale de 50.3% en septembre. Ces vitesses de vent auront une influence très faible sur la dispersion des polluants, ce qui doit être pris en compte du point de vue du confort respiratoire.

Les schémas ci-dessous présentent des roses des vents à Uccle (Bruxelles) pour une année météorologique type. La rose des vents de gauche montre uniquement la vitesse moyenne du vent selon les 12 orientations. On voit que cette vitesse est fort constante et varie entre 2.62 m/s et 4.61 m/s. La moyenne totale de la vitesse du vent à Uccle pour l'année type météorologique est de 3.83 m/s. La rose des vents de droite donne uniquement la répartition en fréquence des 12 orientations du vent (% de temps).



On voit que les vents dominants sont les vents provenant du Sud-ouest (comprenant les vents du SSO et du SOO), c'est-à-dire ayant un angle compris entre 195° et 254° par rapport au Nord, et qu'ils soufflent à une fréquence de 42% du temps.

La turbulence du vent est la dispersion de sa vitesse instantanée autour de sa vitesse moyenne ; elle est caractérisée (sur la période T) par l'écart-type σ . L'écart-type est la racine carrée de la moyenne sur la période T du carré des fluctuations de vitesse : $\sigma = \sqrt{U'^2}$. La pointe de la vitesse du vent de moyenne V sur la période T peut être évaluée à partir de la formule : $U_{max} = U + 3,5 \sigma$.

La variabilité de la vitesse du vent dans le temps et dans l'espace influence fortement le confort des piétons parce qu'elle nécessite une adaptabilité quasi instantanée de l'individu.

Les effets négatifs de rafales de vent à haute vitesse ont été analysés par Melbourne et Joubert en 1971. Melbourne et Joubert ont mesuré la vitesse du vent près d'un bâtiment très élevé en Australie lorsque les piétons luttèrent contre des vents violents. Ils ont observé que des vitesses de rafales de l'ordre de 22 à 28 m/s, associées à une moyenne des vitesses de l'ordre de 12 à 15 m/s, sont suffisantes pour jeter quelqu'un par terre. (Melbourne & Joubert 1971)

La photo ci-dessous montre l'inconfort au vent au pied d'une tour située à la porte de Namur à Bruxelles. Au passage du coin, il est parfois nécessaire de se plier en deux pour avancer malgré le vent...



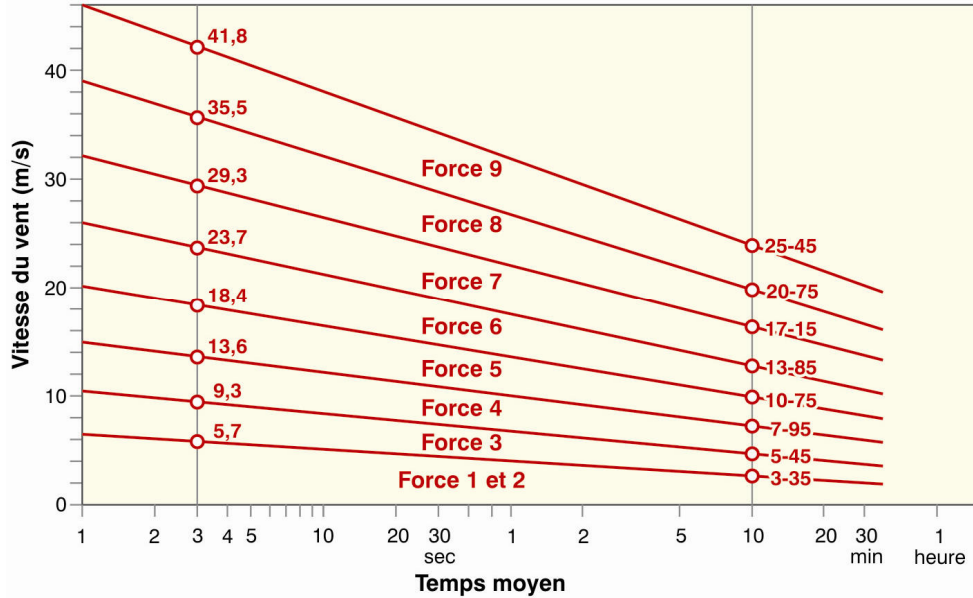
(Photo : S. Reiter).

Différents auteurs ont relevé des cas de mort suite à des vents violents en ville, en dessous de bâtiments élevés (plus de 15 étages). Lors de la mort d'une femme en Angleterre, la vitesse moyenne du vent local a été évaluée à environ 15 à 24 m/s au niveau piéton, avec des rafales allant jusqu'à 30m/s près du coin de la tour contre lequel s'est écrasée la malheureuse. La valeur exacte d'insécurité due au vent dépend de l'âge, de la taille et du poids, de l'habillement et de la condition physique de la personne exposée (Murakami et al. 1980). Il faut signaler que même lorsque ces incidents climatologiques ne sont que désagréables pour des personnes d'âge moyen et en bonne santé, elles peuvent être critiques pour des personnes dont l'équilibre est plus difficile; citons notamment les vieilles personnes et les cyclistes.

Toutefois, lorsqu'un vent souffle régulièrement en rafales allant jusqu'à 20m/s, tout le monde semble avoir de fortes difficultés à garder l'équilibre, particulièrement lorsque le vent frappe latéralement. Melbourne et Joubert affirment qu'il est beaucoup moins difficile de se tenir debout sous une vitesse de vent stable élevée que pour un vent de même vitesse moyenne, dont la vitesse de flux habituelle est plus faible mais qui présente des piques de vitesses turbulentes plus élevées: c'est la nature aléatoire de la turbulence qui renverse le plus souvent les piétons (Melbourne & Joubert 1971). D'autres études ont confirmé par la suite cette conclusion (Bottema 2000). On peut donc affirmer que les personnes sont plus affectées par des vents spatialement non uniformes et par les turbulences temporaires du vent que par des vents uniformes même s'ils sont plus forts. Bottema affirme que les effets d'un vent non uniforme correspondent environ aux effets d'un vent uniforme dont la vitesse serait égale à la vitesse maximale du vent non uniforme multipliée par un facteur 1.5, c'est-à-dire $U=1.5*U_{max}$ (Bottema 1993).

L'aménagement du territoire et la présence de bâtiments changent non seulement la vitesse du vent mais aussi sa turbulence, de telle sorte qu'on peut dépasser un nombre de Beaufort soit par une vitesse de vent moyenne élevée soit par une forte turbulence. Notons qu'à Uccle, le rapport de la pointe maximale du vent à sa vitesse moyenne bihoraire vaut en moyenne 1,9 et qu'en outre la durée d'un coup de vent t_g est de l'ordre de 2 secondes (Sneyers 1980).

L'approche utilisée par le "Département of Aeronautical Engineering" de l'université de Bristol, décrite par Lawson, associe des niveaux de turbulence à la classification de la force du vent par Beaufort. Pour un vent de chaque classe de Beaufort, supposé avoir la même structure qu'en rase campagne, le diagramme ci-dessous donne les vitesses maximales de vent, variant en fonction du temps pendant lequel les mesures sont moyennées. Par exemple, un vent de force Beaufort 4 correspond non seulement à un vent de vitesse moyenne de 5.45 à 7.95 m/s pour une moyenne effectuée sur 10 minutes mais aussi des pointes maximales de vitesse de 9.3 à 13.6 m/s pour des rafales de vent dont la moyenne est réalisée sur 3 secondes (Lawson 1973).



Variation des limites de l'échelle de Beaufort en fonction de la vitesse du vent et de son temps d'évaluation (Lawson 1973).

La correspondance entre σ et la vitesse moyenne de référence s'exprime par la formule suivante : $\sigma = I U_{ref}$

Où σ est l'écart-type de la vitesse instantanée (m/s)

$I = \sigma / U$ est l'intensité de turbulence.

U_{ref} est la vitesse moyenne de référence (m/s).

Le tableau ci-dessous donne des valeurs typiques de l'intensité de turbulence en fonction de l'aménagement du sol. Par exemple, l'intensité de turbulence vaut 0.4 au centre de Bruxelles, 0.3 pour la commune de Woluwé (en périphérie de Bruxelles) et 0.25 dans les lotissements du Brabant wallon (ville diffuse).

Terrain	Mer, lac,...	Rase campagne	Bocage, Banlieue peu dense	Tissu suburbain	Zone urbaine	Centre ville
Intensité de turbulence	0.17	0.2	0.22	0.25	0.3	0.4

(Gandemer & Guyot 1981 ; Folcher 1990)

Dans de nombreuses études, l'intensité de turbulence était considérée comme constante. Or, par sa définition, l'intensité de turbulence I dépend de la vitesse

moyenne V du vent, qui varie fort en fonction du type de terrain et de la présence d'obstacles. Elle ne peut donc en aucun cas être considérée constante.

Les données de turbulence sont rares dans la littérature. Des mesures précises de l'intensité de turbulence d'un flux d'air nécessitent l'utilisation d'un Laser Doppler dès que l'intensité de turbulence risque de dépasser les 30%. Les mesures de Bottema par Laser Doppler montrent que les variations de la turbulence (σ_u) autour d'un obstacle sont nettement plus faibles que les variations de vitesse moyenne du vent. Donc, pour une toute première approximation, on peut prendre σ_u constante. En estimant que le σ_u local est égal à celui mesuré à la station météo, l'erreur relative sur l'intensité de turbulence est d'environ 15% (Bottema 1993) Cette comparaison n'est toutefois valable que pour des climats semblables à ceux de Amsterdam, ce qui est le cas de la Belgique.

Dans de très nombreuses publications, une **vitesse du vent effective** est utilisée pour prendre en compte cet effet de turbulence sur le confort des personnes: $U_e = U + k \sigma_u$

où U est la moyenne des vitesses du vent,

k un facteur de pointe constant,

σ est la déviation standard des fluctuations de la vitesse du vent.

Le grand problème dans la conversion des vitesses de rafales en vitesses de vent équivalentes est l'estimation du facteur de pointe k . Lorsque la durée de turbulence t_g , la moyenne de temps total T_{av} et la fonction de probabilité de la densité de la vitesse du vent sont connus, on peut déterminer k . Malheureusement, aucune expression universelle valide de cette probabilité n'est connue. Ainsi, le facteur de pique k varie considérablement entre 0 et 4 selon les auteurs.

Les critères de confort

Un critère de confort est la combinaison d'une limite d'inconfort et de sa probabilité maximale acceptable. La limite d'inconfort définit la limite à partir de laquelle le vent commence à devenir déplaisant pour une activité déterminée; la limite de danger définit la limite à partir de laquelle le vent devient dangereux. Il existe de très nombreux critères de confort dans la littérature.

On peut répartir les multiples limites d'inconfort rencontrées dans la littérature en trois groupes, en fonction de leur caractérisation du vent à l'aide des trois paramètres suivants :

- la vitesse moyenne du vent \bar{U} ,
- la vitesse de rafale ou turbulence de pointe \hat{U} ,
- la vitesse effective : $U_e = U + k \sigma$ (avec k compris entre 1 et 4)

Le tableau ci-dessous donne un aperçu des principaux critères d'inconfort au vent, classés en fonction de leur domaine d'application. (Gandemer 1976, Isyumov & Davenport 1975, Lawson 1978, Visser 1980, Beranek 1984, Melbourne 1978, Murakami et al. 1986, Lawson & Penwarden 1975, Bottema 2000). Il ressort de ce tableau que le critère de confort pour les activités courantes et le critère de sécurité (destiné à supprimer les risques de danger) sont deux critères qui doivent être choisis séparément.

Domaine d'application	Limites d'inconfort	Probabilité maximale acceptable	Auteur
Rester debout/assis pendant une longue durée	$U + \sigma_u > 6 \text{ m/s}$	2%	Gandemer
	$U > 3$ Beaufort	0.14%	Isyumov & Davenport
	$U > 3$ Beaufort	4%	Lawson
	$U > 5 \text{ m/s}$	0.03%	Visser
	$\hat{U}_3 > 10 \text{ m/s}$	1 heure par an	Beranek
	$U + 3.5 \sigma_u > 10 \text{ m/s}$	1 heure par an	Melbourne
Rester debout ou assis pendant une courte durée	$U + \sigma_u > 6 \text{ m/s}$	10%	Gandemer
	$U > 4$ Beaufort	0.14%	Isyumov & Davenport
	$U > 4$ Beaufort	4%	Lawson
	$U > 5 \text{ m/s}$	1.37%	Visser
	$\hat{U}_3 > 15 \text{ m/s}$	1 heure par an	Beranek
	$U + 3.5 \sigma_u > 13 \text{ m/s}$	1 heure par an	Melbourne
	$\hat{U}_3 > 9 \text{ m/s}$	10%	Murakami et al.
Se promener, flâner, patiner	$U + \sigma_u > 6 \text{ m/s}$	15%	Gandemer
	$U > 5$ Beaufort	0.14%	Isyumov & Davenport
	$U > 5$ Beaufort	2%	Lawson
	$U > 5 \text{ m/s}$	9.6%	Visser
	$\hat{U}_3 > 20 \text{ m/s}$	1 heure par an	Beranek
	$U + 3.5 \sigma_u > 16 \text{ m/s}$	1 heure par an	Melbourne
	$\hat{U}_3 > 13.5 \text{ m/s}$	3.6%	Murakami et al.
	$U > 5 \text{ m/s} (*)$	15%	Lawson & Penwarden
Marcher rapidement	$U + \sigma_u > 6 \text{ m/s}$	22 à 26%	Bottema
	$U > 6$ Beaufort	0.14%	Isyumov & Davenport
	$U > 6$ Beaufort	2%	Lawson
	$U > 5 \text{ m/s}$	20.5%	Visser
	$\hat{U}_3 > 25 \text{ m/s}$	1 heure par an	Beranek
	$\hat{U}_3 > 13.5 \text{ m/s}$	7%	Murakami et al.
Risque de danger	$U > 7$ Beaufort	0.14%	Isyumov & Davenport
	$U + 3.5 \sigma_u > 23 \text{ m/s}$	1 heure par an	Melbourne
	$U + 3\sigma_u > 20 \text{ m/s}$	0.18 à 0.044% (= 4h/an)	Bottema

(*) = Limite à laquelle les commerçants commencent à utiliser des remèdes pour réduire le vent aux abords de leurs magasins.

Il faut encore signaler une méthode un peu plus complexe : la moyenne équivalente (processus GEM : gust equivalent mean). Cette méthode a déjà été appliquée par Lawson (Lawson 1990), par Durgin (Durgin 1997) et Soligo (Soligo et al. 1998). En résumé, ce critère tient compte à la fois de la moyenne des vitesses du vent et plusieurs valeurs de turbulence. Chacune de ces valeurs étant pondérée, la valeur la plus élevée est alors prise en considération pour évaluer le niveau de confort. Ces différents auteurs ne choisissent toutefois pas les mêmes valeurs de pondération pour la sélection des critères. Leur conclusion est que lorsque des vents sont très turbulents, il s'agit de la valeur de rafale qui est la plus importante alors que pour des vents moins turbulents, c'est la valeur moyenne du vent qui prédomine.

Ces réflexions nous poussent à conclure qu'il peut être judicieux de choisir un couple de deux critères dont l'un est adapté aux rafales ou vitesses de pointe du vent et concerne davantage le danger des personnes alors que l'autre évalue les situations quotidiennes et correspond donc plutôt à un critère de confort pour effectuer différentes activités.

Il est très difficile de comparer les critères de ces multiples références pour plusieurs raisons :

- parce qu'il n'est pas toujours clair de savoir à quelle hauteur ces critères sont déterminés (entre 1.5 et 2m de haut). Notons d'ailleurs que de nombreux auteurs ont choisi 2m, ce qui se trouve au-dessus de la tête de la majorité des personnes. Nous recommandons d'évaluer le confort au vent à 1.5 m de haut, ce qui correspond davantage au vent que l'on reçoit directement contre soi.
- parce que les limites d'inconfort trouvées dépendent fort du type d'activité. Notons que, dans la liste des critères de confort donnés, deux limites d'inconfort sont valables pour toutes les activités humaines mais selon des probabilités maximales différentes en fonction de l'activité:
 - $U + \sigma_u > 6\text{m/s}$ (critère de Gandemer + Bottema)
 - $U > 5\text{m/s}$ (critère de Visser + Lawson & Penwarden)
- parce qu'un seuil de gêne ne représente rien en soi si on ne lui associe pas une fréquence d'inconfort, à savoir le paramétrage du temps pendant lequel le seuil est atteint ou dépassé et que les probabilités d'occurrence des vents sont un peu incertaines.

Les données de Murakami (observations réalisées sur 2000 personnes) montrent qu'en-dessous de 20% d'intensité de turbulence, les personnes ne perçoivent pas la turbulence (Murakami et al. 1986). Durgin, lui, a trouvé que lorsque l'intensité de turbulence est inférieure à 20% en un point, la vitesse moyenne du vent est un paramètre suffisant pour caractériser le confort des piétons mais que pour les zones où la turbulence est supérieure à 20%, il est important de tenir compte des valeurs de turbulence (Durgin 1997).

D'autre part, en zone urbaine, l'augmentation de la turbulence induite par les constructions pose des problèmes sérieux. Ainsi, considérant l'importance que peuvent avoir les paramètres de la vitesse moyenne du vent (U) et de sa turbulence, il nous semble logique d'exprimer la gêne due au vent sous la forme d'un paramètre qui prenne ces deux éléments en compte. Le choix de la vitesse effective nous semble le paramètre le plus approprié: lorsque la turbulence est faible (<20%) la vitesse effective est très proche de la vitesse moyenne du vent alors que pour des valeurs supérieures de turbulence la vitesse effective intègre réellement l'influence de la turbulence. Notre choix se porte donc sur le paramètre de sélection suivant : $U_e = U + k \sigma$. Pour ce critère de confort, plusieurs opinions différentes existent sur la valeur la plus appropriée de k , dans l'intervalle de 1 à 4. Le choix de $3 < k < 4$ implique que l'élément le plus important pour le confort est la turbulence de pointe occasionnelle. Les valeurs plus faibles de k indiquent que le confort dépend surtout des conditions habituelles de vent.

De ce qui a déjà été présenté ci-dessus, on peut déduire qu'il n'est pas judicieux de prendre une même valeur de k pour déterminer la limite de confort des piétons en situations habituelles et la limite de sécurité qui dépend évidemment de cas extrêmes. De manière intuitive, la limite de confort des piétons nécessite une valeur de k faible puisqu'il s'agit surtout de l'importance de la vitesse du vent et des

turbulences habituelles. Par contre, puisque ce sont les rafales de vent aléatoires qui renversent le plus souvent les personnes, le facteur k devrait être plus élevé pour le critère de sécurité afin de tenir réellement compte de la pointe de vent occasionnelle.

Jackson a effectué des enquêtes dans une rue venteuse de Wellington en Nouvelle Zélande. Sur 6 jours pendant lesquels la vitesse moyenne du vent varie entre 2 et 6m/s et l'intensité de turbulence (I) entre 17 et 55%. Septante passants ont été questionnés sur leur sensation de confort et sur les conditions météorologiques extérieures (Jackson 1978). Cette étude nous semble spécialement importante parce qu'elle se base sur des cas réels et pas sur des études en tunnel à vent. Jackson a ensuite mêlé ses résultats avec des résultats de Hunt réalisés en tunnel à vent. Cependant, une régression effectuée par Bottema sur les résultats de Jackson (séparés de ceux de Hunt) donne un facteur k entre 0.9 et 1.3 (Bottema 2000). Les données de Hunt réalisées en tunnel à vent ont été écartées parce qu'elles ont été réalisées pour des intensités de turbulence de 0 à 12%, ce qui est trop faible pour évaluer le vent dans un environnement construit réel. Si on pondère ces résultats en tenant compte de la valeur habituelle de la turbulence atmosphérique (20 à 30 %), le k provenant des études de Hunt vaudrait environ 1. Il nous semble donc justifié de prendre pour k la valeur de 1, ce qui donne l'expression $U + \sigma_u$ comme limite d'inconfort.

D'autre part, en introduisant comme seuil de l'inconfort les valeurs communément admises suivantes:

- $U \leq 5\text{m/s}$, début des manifestations déplaisantes (soulèvement de poussières, cheveux décoiffés,...), limite à laquelle les commerçants commencent à utiliser des remèdes pour réduire le vent aux abords de leurs magasins (Lawson & Penwarden 1975) et limite choisie dans la législation de San Francisco (Bosselmann et al. 1988),

et

- $\sigma = 1\text{m/s}$ correspondant à la turbulence qui règne au niveau du sol en rase campagne (intensité de turbulence 20%) pour une vitesse moyenne de 5m/s,

la condition de confort à respecter s'écrit: $U + \sigma \leq 6\text{m/s}$ (ce qui correspond au critère trouvé par Gandemer et choisi par Bottema).

Inévitablement, le choix d'une **limite de confort** est quelque peu subjectif, un choix raisonnable est en tous cas celui-ci : $U + \sigma_u \leq 6\text{m/s}$.

En première approximation, nous avons vu que nous pouvons considérer que σ_u est constant et égale au σ_u de la station météo. Nous validons donc la limite de confort suivante **pour une évaluation rapide du confort au vent : $U \leq 5\text{m/s}$** . Cette formule est légèrement moins précise que la précédente mais présente l'avantage d'une grande simplicité, ce qui peut être vraiment intéressant lors de la phase d'évaluation d'un avant projet. Ce critère a déjà été très largement utilisé dans la littérature (Visser + Lawson, Penwarden, Wise,...)

Il y a relativement peu de données et de limites fixées pour la sécurité des personnes vu la difficulté de réaliser ce genre d'études.

La limite de danger de Melbourne, $U + 3.5\sigma_u > 23\text{m/s}$ (Melbourne 1978), est souvent citée mais elle ne s'applique qu'à des personnes jeunes et en forme. Les personnes âgées ont un moins bon équilibre et pour elles il faut donc un critère plus sévère.

De plus, ces personnes ont plus de risque d'être blessées si elles tombent par terre. Ajoutons également que les cyclistes font également partie des personnes qui ont un moins bon équilibre et pour qui ce critère n'est pas assez fort.

Il a été montré que des rafales d'une durée t_g de 0.5 à 10 s sont les plus critiques. Les premiers effets (cheveux décoiffés,...) notés par le vent apparaissent pour des vitesses de rafales U_g d'environ 5m/s. Plus la vitesse de vent augmente, plus les effets du vent sur l'équilibre de la marche augmentent, causant du danger pour les personnes âgées pour $U_g > 15\text{m/s}$ et pour les personnes d'âge moyen pour $U_g > 20\text{m/s}$.

L'article de Jackson déjà cité permet de retirer différentes valeurs des effets du vent sur les personnes. De grandes difficultés d'équilibre pour des personnes d'âge moyen et en bonne santé commencent lorsque les rafales de vent dépassent 20m/s avec une durée type de la rafale d'environ 3secondes. En simulant une répartition de turbulence de Gauss, on obtient pour une durée d'une heure: un facteur k légèrement supérieur à 3. Notre choix se porte donc sur le critère de danger de Bottema : $U + 3\sigma_u > 20\text{m/s}$, plus sévère que celui de Melbourne. Pour une intensité de turbulence de 20%, ce critère est en accord avec le fait de limiter la vitesse du vent en-dessous de 8 Beaufort. Il faut rappeler qu'à partir de 8 Beaufort, on a des grandes difficultés d'équilibre et à partir de 9 Beaufort les personnes sont jetées à terre. Notons aussi qu'à partir de 9 Beaufort, les pertes d'équilibre ne sont plus le seul danger: des tuiles tombent des toits, de grosses branches d'arbre sont emportées par le vent,...

Notre choix des limites de confort et de sécurité des piétons se portent donc sur les deux équations suivantes :

- **confort : $U + \sigma_u \leq 6\text{m/s}$ ou en première approximation $U \leq 5\text{m/s}$**
- **sécurité : $U + 3 \sigma_u \leq 20\text{m/s}$**

Toutefois, un critère d'inconfort complet doit être défini en fonction d'une probabilité maximale permise. Les probabilités de l'inconfort et du danger sont définies comme le pourcentage de temps pendant lequel les critères d'inconfort et de danger sont dépassés. Le choix de la probabilité maximale de temps d'inconfort permis est probablement la partie la plus délicate de cette étude.

Gandemer donne les valeurs limites suivantes comme fréquence admissible pour le dépassement des vitesses de vent confortables (Gandemer 1982).

Activités	Fréquence d'inconfort admissible
Station immobile prolongée (place, terrasse de café,...)	5%
Station immobile courte (aire de jeux, rue commerçante, galerie,...)	10%
Marche normale (promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble,...)	15%
Marche rapide (Parkings, trottoirs,...)	25%

Penwarden et Wise assurent que les zones commerciales où la fréquence d'une vitesse de vent inconfortable dépasse 20% du temps correspondent de manière générale aux lieux où des aménagements coûteux ont été réalisés par les commerçants pour améliorer la situation. Lorsque les vitesses de vent dépassent la

limite de confort de 10 à 20% du temps, les plaintes sur l'environnement au niveau du vent peuvent survenir après la construction. En dessous d'à peu près 10% de temps de dépassement de la limite de confort, il ne risque plus d'y avoir de plainte. Ces pourcentages ont été étudiés pour des zones commerciales extérieures mais peuvent être étendus à toute zone extérieure de flâneries avec des moments d'arrêt occasionnels, ce qui correspond bien à la limite choisie par Gandemer comme fréquence de confort pour une station immobile courte.

Dans le cas de situations dangereuses, la résolution est plus simple : il est habituel de considérer qu'aucune turbulence ou vitesse de vent équivalente ne doit dépasser la limite de danger pendant une heure par an.

Notre choix se porte sur les deux critères de confort suivants :

- **inconfort : $P(U + \sigma_u > 6\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, avec U vitesse moyenne horaire à 1.5 m du sol et $U + \sigma_u$ est la vitesse de vent effective. P_{max} est une probabilité maximale de 5% pour un long séjour immobile, de 10% pour un court séjour immobile et de 15% pour flâner.**
- **danger : $P(U + 3\sigma_u > 20\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, où $P_{\text{max}} = 1 \text{ heure/an} = 0.01 \%$. Le terme $U + 3\sigma_u$ correspond à vitesse effective pour une turbulence maximale mesurée en une heure par moyennes de 3 secondes de mesures.**

L'évaluation de probabilités implique que les statistiques de vent à long terme sont connues. Il est donc nécessaire de relier la moyenne des vitesses de vent locales et les conditions locales de turbulence d'un site aux mesures statistiques de la station météorologique la plus proche.

En général, le dépassement d'une certaine vitesse de vent peut être évalué à partir de la distribution de Weibull, définie par :

$$P(U > U_0) = \exp[-(U_0/U_r)^k]$$

où $P(U > U_0)$ est la probabilité que U dépasse U_0 ,

U est la vitesse du vent,

U_0 est la vitesse du vent limite,

U_r est l'échelle de la vitesse de vent de Weibull qui peut être remplacée par la vitesse moyenne du vent

k est un facteur de forme qui tourne autour de 2 (Melbourne 1978).

Cependant, une distribution simple de Weibull ne couvre généralement pas les données réelles du vent sur toute la gamme des probabilités. Donc, en pratique, le calcul est souvent réalisé à partir des statistiques de vent de la station météorologique locale.

Nous avons analysé les données statistiques du vent en Belgique à partir d'une année météorologique type élaborée par l'IRM sur base des données météorologiques d'Uccle (Bruxelles). Nous en avons tiré le tableau et les graphes ci-dessous.

Pour réaliser un calcul précis, nous donnons ci-dessous le tableau de valeurs de la fréquence de dépassement (%) de la vitesse du vent à Uccle en fonction de son orientation. Les schémas qui suivent représentent de manière graphique ces fréquences de dépassement des vitesses de vent à Uccle (Bruxelles).

Fréquence de dépassement (%) de la vitesse du vent Umétéo, max en fonction de son orientation pour Uccle (Bruxelles)

Vent (m/s)	Orientation du vent											
	N	NNE	NEE	E	EES	ESS	S	SSO	SOO	O	OON	ONN
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,1	99,8	100	100	100	100	100	99,9	100	100	100	100	100
0,2	99,5	100	100	100	100	100	99,7	100	100	100	100	100
0,3	99,5	100	99,9	100	100	100	99,7	100	100	99,9	99,4	100
0,4	99,5	100	99,9	100	100	100	99,6	100	100	99,9	99,4	100
0,5	98,3	100	99,9	100	100	99,4	99,5	100	99,9	99,3	99,4	99,8
0,6	97,8	99	99,5	99	100	97,3	99,2	99,5	99,8	98,4	98,9	98,8
0,7	97,1	97,4	99,5	98,1	99,4	96,2	98,5	99,3	99,5	97,1	98,6	97,6
0,8	97,1	95,8	99,5	98,1	98,3	95,4	98,2	99	99,3	96,8	98,6	96,7
0,9	96,6	95,8	99,2	97,1	98,3	95,1	97,6	98,9	99,1	96,7	98,6	96,1
1	96,6	95,4	98,7	95,2	96,7	93,9	97	98,2	98,2	95,5	97,3	93,9
1,1	95,9	93,5	98,15	91,4	93,9	93,3	96,8	97,5	97,1	93,4	95,9	92,6
1,2	95,9	93,2	97,6	90,5	93,9	93,3	96,5	97,5	97	93,3	95,9	92,4
1,3	95,4	91,2	96,3	88,1	91,7	92,9	95,4	96,4	96,3	92,2	95,6	91
1,4	94,2	88,6	95,5	86,7	91,1	91,2	94,4	95,7	95,2	91,2	93,7	88,7
1,5	94	88,6	95,2	86,7	91,1	90,7	93,8	95,6	95	91,2	93,2	88,7
1,6	92,5	87	93,4	84,8	89,4	89,7	91,6	94,5	93,9	89,7	92,7	87,7
1,7	91,3	85,7	91,9	81,4	86,1	88,6	89	92,6	92	88,6	91,3	86,1
1,8	89,6	83,8	90,6	77,6	84,4	86,9	87	90,8	90,6	86,7	90,7	84,2
1,9	88,9	82,5	90	76,2	82,8	85,9	85,7	89,1	89,8	86,3	90,5	83,6
2	87	79,9	88,5	75,2	80	83,6	84,2	88,5	88,8	85,4	89,7	82,8
2,1	84,3	72,7	86,7	72,4	73,9	80,7	80,8	86,4	86,5	82,9	88,6	81,2
2,2	81,1	72,7	84	67,1	68,9	76,7	75,2	83,9	81,5	79,2	84,8	80,2
2,3	80,9	72,7	84	66,2	68,3	76,4	75	83,8	81,3	79,1	84,5	79,9
2,4	77,5	70,1	81	61,9	60,5	72,5	71,7	80,7	77,9	75,7	81,8	76,9
2,5	74,15	64,9	78,2	59,5	57,2	68,5	68,1	78,8	75,3	72,7	80,7	75
2,6	74,15	64,9	78,1	58,6	57,2	68,2	68,1	78,4	74,7	72,7	80,7	74,7
2,7	69,3	60,7	73,9	53,8	53,3	64,9	66,5	76,4	71	69,1	78,8	70,8
2,8	66,4	56,2	70,6	46,2	42,8	61,5	63	73,4	66,7	66,5	75,2	67,9
2,9	65,2	55,5	70,3	46,2	41,7	61,2	62,5	72,8	66	66,4	75	67,4
3	60,4	51,3	66,5	38,1	37,8	59	59,3	70	63,5	63,1	73,9	64,2
3,1	57,2	47,7	62,9	33,3	32,8	57,1	55,9	67,4	60,8	59,3	71,1	60,7
3,2	51	43,5	59,9	23,8	28,3	54,7	52,5	64,5	58	56,5	69,3	55,3
3,3	47,3	40,3	57,8	18,1	25,5	51,5	49,1	62,7	55,5	52,3	67,7	53,4
3,4	47,1	40,3	57,4	17,1	24,4	50,6	48,7	61,8	54,9	52,2	67,1	52,8
3,5	43,5	36	55,3	11,4	22,8	48	45,1	58,6	52,2	49,8	64,1	49,5
3,6	39,8	34,4	52,1	9	20	45,9	42,6	55,8	49,8	47,1	63	45,6
3,7	39,8	34,3	52	9	19,4	45,9	42,6	55	49,5	47	63	45,3
3,8	35,7	30,5	49,3	7,6	16,7	43,5	39,1	52,3	47,4	44,4	59,8	42,3
3,9	31,1	27,3	47	4,3	13,3	40,6	36,8	49,7	44,9	40,7	58,1	39,8
4	29,9	26,9	46,83	3,8	13,3	40,1	36,5	49,1	44,6	40,3	56,8	38,6
4,1	25,8	25,6	44,8	1,4	10,5	38,4	34,5	47	42,2	37,7	54,9	36,1
4,2	22,2	23,7	43,1	0,95	6,7	35,7	32,3	44,9	39,5	34,7	52,2	32,8
4,3	19,08	21,7	40	0,95	5	32,8	30	42,2	36,9	32,7	50,5	29,7
4,4	13,5	19,48	35,9	0,5	4,4	30,1	28,2	39,7	34,2	30	48,6	26,6
4,5	13,3	19,48	34,6	0,5	3,9	29,33	28	38,6	33,6	29	48,4	25,4
4,6	11,1	18,2	34,3	0	3,9	27,5	25,6	35,4	31,1	26,7	46,5	22,8

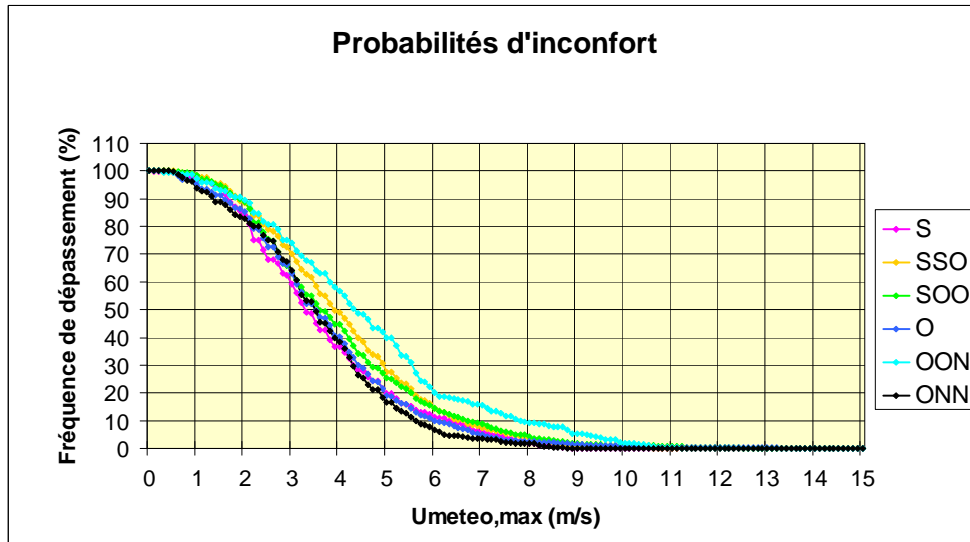
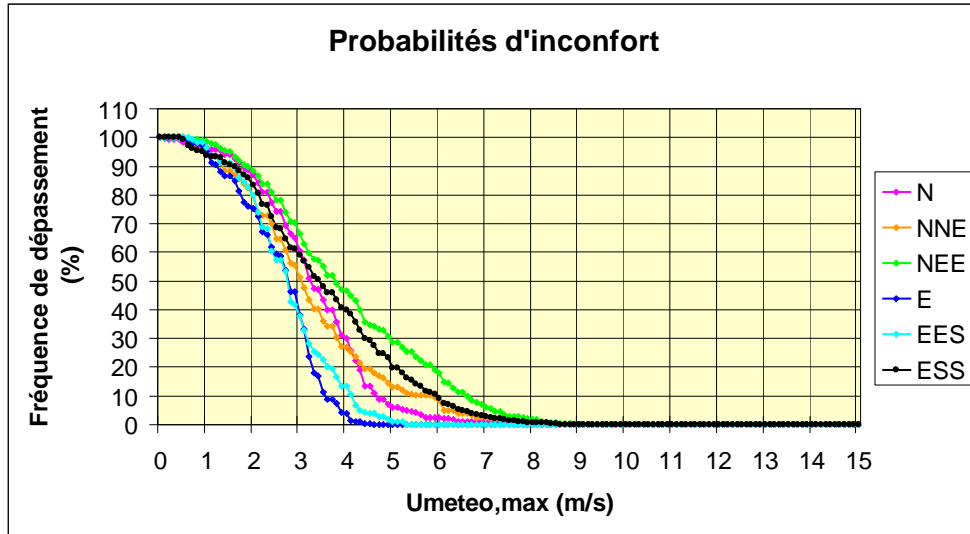
Conception des ambiances urbaines

4,7	8,9	16,9	33,1	0	2,8	24,9	24,2	33,7	29,3	24,4	43,2	21
4,8	8,9	16,2	33	0	2,8	24,6	24,2	33	29	24	43,2	21
4,9	7	14,6	30,9	0	1,7	23,5	21,5	30,6	27,1	21,4	41,8	18,2
5	6	13	28,6	0	1,1	19,9	19,7	27,6	25,5	19	39,7	16,7
5,1	6	13	28,6	0	1,1	19,9	19,7	27,4	25,2	18,8	39,7	16,6
5,2	5,3	12	26,8	0	1,1	18,2	18,1	25,4	23,6	17,1	36,9	14,6
5,3	4,8	11	25,5	0	0	16,1	16,33	23,7	22,1	16,3	33,4	13,3
5,4	4,6	10,7	25,3	0	0	15,6	16	23,1	21,5	15,8	33,1	12,7
5,5	4,3	10,4	23,6	0	0	14,1	15,1	21,6	20,2	14,4	31	11,4
5,6	3,6	10,4	22,2	0	0	13,4	13,8	19,2	18,1	13,1	27,2	9,9
5,7	2,6	10,1	20,7	0	0	11,7	13,2	17,6	16,9	11,9	24,2	8,9
5,8	2,6	10,1	20,7	0	0	11,4	13,1	17,1	16,2	11,8	23,9	8,3
5,9	2,6	9,4	19,1	0	0	10,6	12,3	16,3	15,5	10,8	22,3	7,7
6	2,6	8,4	18,1	0	0	9,1	11,4	14,5	14,6	10	20,1	6,8
6,1	2,2	4,9	14,8	0	0	7,4	11,1	13,4	13,4	9,5	18,75	5,9
6,2	2,2	4,9	14,5	0	0	7	10,8	13	13,2	9,3	18,75	5
6,3	1,7	4,9	12,8	0	0	6,2	9,8	12,1	12,2	8,7	18,2	4,7
6,4	1,2	3,9	11,3	0	0	5,3	9,4	10,7	11,5	8	17,9	4,7
6,5	1,2	3,9	11,2	0	0	5	9	10,3	11,2	7,5	17,7	4,6
6,6	1,2	3,9	9,8	0	0	4,5	8,3	10,1	10,5	7	17,4	4,4
6,7	1,2	3,6	8,6	0	0	3,9	7,6	8,9	10	6,6	16,8	4
6,8	1,2	2,6	7,8	0	0	3,6	6,7	8,4	9,4	5,5	16	3,4
6,9	1,2	2,6	7	0	0	3,3	6,4	8,2	9,2	5,4	16	3,4
7	1	2,3	5,9	0	0	2,7	5,9	7,5	8,9	5,1	15,5	3,4
7,1	0,7	2,3	5,5	0	0	2,4	5,2	7	8,1	4,2	14,4	3,2
7,2	0,7	1,9	4,5	0	0	2,1	5,1	6,6	7,3	3,8	13,3	3,2
7,3	0,7	1,9	4,5	0	0	2	4,9	6,5	7,2	3,8	13,3	3
7,4	0,7	1,6	3,6	0	0	1,7	4,5	6	6,5	3,3	12,8	2,4
7,5	0,5	1,3	3	0	0	1,5	3,9	5,4	5,9	2,8	11,7	2,2
7,6	0,5	1,3	3	0	0	1,4	3,7	5,4	5,8	2,8	11,7	2,2
7,7	0,5	1,3	2,9	0	0	0,9	2,9	4,6	5,1	2,8	10,6	1,9
7,8	0,5	1	2,4	0	0	0,9	2,7	4,4	5	2,5	9,8	1,8
7,9	0,5	1	2,2	0	0	0,8	2,1	4,2	4,8	2,5	9,5	1,8
8	0,2	1	1,8	0	0	0,8	1,9	3,7	4,2	2,4	9,2	1,6
8,1	0,2	1	1,6	0	0	0,6	1,6	3,3	3,7	2,4	9	1,6
8,2	0	1	1,2	0	0	0,6	1,2	2,8	3,4	2,2	8,7	1
8,3	0	0,6	0,8	0	0	0,6	1,1	2,3	3,1	2,2	8,7	0,7
8,4	0	0,3	0,8	0	0	0,4	0,9	2,2	3	2,1	8,1	0,6
8,5	0	0	0,8	0	0	0,4	0,9	1,9	2,7	2	7,6	0,3
8,6	0	0	0,3	0	0	0,1	0,7	1,5	2,4	1,8	7,6	0,3
8,7	0	0	0,3	0	0	0,1	0,5	1,4	2,3	1,8	7,6	0,3
8,8	0	0	0,3	0	0	0	0,5	1,2	2,1	1,8	6,8	0,1
8,9	0	0	0,1	0	0	0	0,1	0,9	1,9	1,4	5,4	0
9	0	0	0,1	0	0	0	0,1	0,9	1,7	1,4	5,4	0
9,1	0	0	0,1	0	0	0	0,1	0,8	1,5	1,4	5,2	0
9,2	0	0	0,1	0	0	0	0,1	0,8	1,5	1,2	4,9	0
9,3	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	1,4	1	4,6	0
9,4	0	0	0	0	0	0	0	0,7	1,4	1	4,1	0
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0,6	1,3	1	3,8	0
9,6	0	0	0	0	0	0	0	0,4	1,2	1	3	0
9,7	0	0	0	0	0	0	0	0,4	1,2	0,9	3	0
9,8	0	0	0	0	0	0	0	0,4	1,2	0,9	3	0
9,9	0	0	0	0	0	0	0	0,4	1,1	0,6	2,2	0

Conception des ambiances urbaines

10	0	0	0	0	0	0	0	0,3	1,1	0,6	1,6	0
10,1	0	0	0	0	0	0	0	0,3	1,1	0,6	1,6	0
10,2	0	0	0	0	0	0	0	0,2	1	0,6	1,6	0
10,3	0	0	0	0	0	0	0	0,2	1	0,6	1,3	0
10,4	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,9	0,6	1,3	0
10,5	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,9	0,6	1,1	0
10,6	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,9	0,5	0,8	0
10,7	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	0,5	0,5	0
10,8	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	0,5	0,5	0
10,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0,5	0,5	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,5	0,3	0
11,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,5	0,3	0
11,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,5	0	0
11,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
11,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
11,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
11,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
11,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,5	0	0
11,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,5	0	0
11,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,5	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0
12,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0
12,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0
12,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0
12,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0
12,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,4	0	0
12,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
12,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
12,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
12,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
13,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0
13,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0
13,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0
13,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0
13,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0
13,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0
13,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les schémas qui suivent représentent de manière graphique ces fréquences de dépassement des vitesses de vent à Uccle (Bruxelles).



La vitesse maximale admissible de la vitesse du vent à la station météorologique doit être calculée, pour chaque secteur de vent, en fonction de la formule suivante :

$$U_{\text{météo, max}} = U_{\text{site, max}} / (K z^\alpha (U/U_0))$$

où K et α sont repris dans le tableau ci-dessous en fonction du type de terrain

Terrain	K	α
Mer	0.7	0.14
Station météo, terrain totalement dégagé	0.68	0.17
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2
Tissu suburbain	0.4	0.235
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25
Centre-ville très dense avec bâtiments très irréguliers.	0.21	0.33

z correspond à la hauteur à laquelle la vitesse du vent est mesurée sur le site (en général 1.5 m).

U est la vitesse du vent sur le site réel

U₀ serait la vitesse du vent sur le site sans obstacle (aucun bâtiment,...).

Le rapport U/U_0 peut être évalué à partir des outils graphiques quantitatifs qui sont élaborés dans la suite de cette thèse pour une hauteur de mesure de 1.5m et un profil de vent urbain.

Si on étudie un site urbain au niveau des piétons ($z=1.5m$), on obtient la formule suivante : $U_{meteo,max} = U_{site,max} / (0.387 (U/U_0))$

où $U_{meteo,max}$ est la vitesse de vent maximale permise à 10m de haut à la station météorologique pour assurer le confort des piétons sur le site.

U/U_0 dépend de la morphologie construite du site et peut être choisi en fonction des graphes donnés plus loin dans cette thèse de doctorat.

$U_{site,max}$ correspond au critère choisi pour le confort des piétons. Selon notre critère de confort, $U_{site,max} = 5m/s$.

Prenons un exemple d'effet de trou sous immeuble pour lequel le rapport U/U_0 serait égal à 1.5. Pour assurer le confort des piétons, on aura

$$U_{meteo,max} = U_{site,max} / (0.387 * 1.5) = 5 / 0.5805 = 8.61m/s$$

Il suffit alors de trouver quelle est la probabilité, en Belgique, que les vitesses du vent dépassent 8.61 m/s pour l'orientation du vent générant l'effet de trou sous immeuble. D'après les tableaux donnés plus haut, la fréquence de dépassement d'un vent de vitesse 8.61 m/s dans la direction SOO (la plus fréquente: 28% du temps) est de 2.4%. Si toutes les autres orientations étaient protégées ne créant pas d'inconfort au vent, on aurait une situation du confort.

Le même calcul doit alors être réalisé pour les différentes orientations du vent, qui génèrent parfois des types d'effets critiques différents. La somme de ces différentes probabilités de dépassement de la valeur $U_{meteo,max}$ pondérées pour chacune des orientations donne enfin la probabilité générale d'inconfort au vent pour ce site et pour le critère d'inconfort choisi.

A l'inverse, connaissant un critère de confort au vent, on peut déterminer quel serait le rapport U/U_0 maximal d'un ensemble construit pour chaque orientation du vent afin qu'il soit confortable pour les piétons.

Par exemple, pour un site en milieu urbain, une limite de la fréquence d'inconfort de 5% et une orientation du vent du SOO à Uccle, on trouve dans les tableaux ci-dessus : $U_{meteo,max} \leq 7.8m/s$, ce qui implique qu'une situation confortable ne peut être assurée que pour un rapport $U/U_0 \leq U_{site,max} / (7.8 * 0.387) = 5/3.02 = 1.66$. Pour la même orientation SOO mais avec une limite de la fréquence d'inconfort de 10%, on aurait une vitesse $U_{meteo,max}$ de 6.7 m/s et un rapport $U/U_0 \leq 1.93$. Prenons maintenant l'orientation OON, pour laquelle les vitesses du vent sont maximales en Belgique. Pour l'orientation OON et une probabilité de dépassement de la limite de confort de 5%, la vitesse $U_{meteo,max}$ vaut 9.2 m/s, ce qui correspond à un rapport $U/U_0 \leq 1.4$ et pour une probabilité de dépassement du critère d'inconfort de 10%, $U_{meteo,max}$ vaut 7.8 m/s et $U/U_0 \leq 1.65$.

De l'exemple précédent, on peut conclure qu'une place urbaine ne créant qu'un effet critique du vent dans une seule direction particulière peut être considérée comme confortable en Belgique si le rapport U/U_0 généré dans cette orientation reste inférieur ou égal à 1.4. Cette valeur correspond à l'hypothèse que, dans les espaces publics de détente, la fréquence maximale de dépassement de la limite de confort vaut 5%.

Dans tous les cas où les effets critiques sont générés par plusieurs orientations du vent, leurs risques mutuels doivent être pondérés en fonction de la probabilité d'occurrence du vent dans chaque orientation puis additionnés les uns aux autres.

La pondération des différentes probabilités déterminées pour chaque secteur angulaire est donnée par la fréquence du vent de chacune de ces orientations suivant le tableau ci-dessous.

Orientations	Angle	Fréquence (%)
NNE	15-44	3,5
NEE	45-74	8,7
E	75-104	2,4
EES	105-134	2,1
ESS	135-164	7,5
S	165-194	8,5
SSO	195-224	14
SOO	225-254	28
O	255-284	8,7
OON	285-314	4,2
ONN	315-344	7,7
N	345-14	4,7

Le pourcentage d'inconfort total vaut alors $\Sigma [(C(\theta) * k(\theta)) / 100]$ [en %]

Où C (θ) est le pourcentage de dépassement de la vitesse du vent $U_{météo}$, max en fonction de l'orientation du vent (θ)

k (θ) est le pourcentage d'occurrence du vent d'orientation θ

Quand la vitesse du vent horaire à la station météorologique n'est pas connue et qu'on possède uniquement la vitesse moyenne annuelle du vent à cette station météorologique, la vitesse moyenne horaire peut être estimée approximativement à partir du tableau ci-dessous (Ashrae 2001). Les valeurs de ce tableau sont basées sur les données de 24 stations météorologiques largement distribués en Amérique du Nord. Dans les stations météorologiques prises en compte pour réaliser ce tableau, les vitesses du vent moyennes annuelles varient entre 3.1 et 6.3 m/s. Les valeurs du rapport $U_{horaire}/U_{annuel}$ sont accompagnées d'une évaluation de l'erreur qui correspond à la déviation standard des rapports de vitesse du vent.

Pourcentage de valeurs moyennes horaires qui dépassent $U_{horaire}$	Rapport de vitesse du vent : $U_{horaire}/U_{annuel}$
90%	0.2 ± 0.1
75%	0.5 ± 0.1
50%	0.8 ± 0.1
25%	1.2 ± 0.15
10%	1.6 ± 0.2
5%	1.9 ± 0.3
1%	2.5 ± 0.4

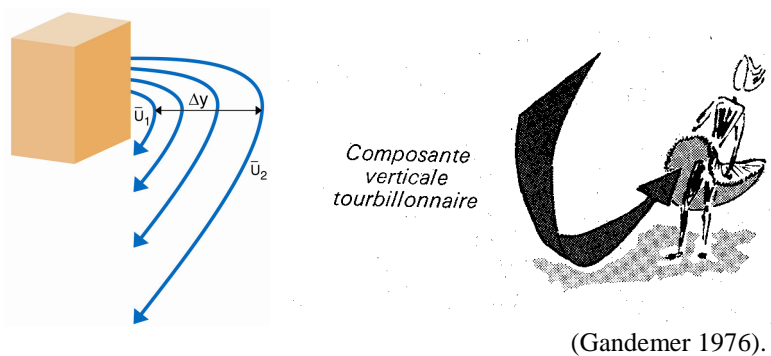
(Ashrae 2001).

Ainsi, prenons un exemple. On cherche la vitesse du vent horaire qui est dépassée 1% du temps, en sachant que U_{annuel} vaut 4m/s dans cette région. A partir du tableau ci-dessus, pour un dépassement de 1% du temps, on trouve le rapport $U_{horaire}/U_{annuel} = 2.5 \pm 0.4$. Donc, $U_{horaire} = (2.5 \pm 0.4) * 4m/s = 10 m/s \pm 1.6 m/s$. Ainsi la vitesse recherchée est comprise entre 8.4 m/s et 11.6 m/s.

Deux phénomènes particuliers d'inconfort au vent

Il faut encore signaler deux phénomènes particuliers d'inconfort au vent (Gandemer 1976) :

- les zones où on observe de forts gradients de vitesse sur une distance limitée. Il suffit de se déplacer au sein d'un ensemble de tours pour se rendre compte que peuvent coexister des zones très calmes et des zones à écoulements rapides ou encore fortement tourbillonnaires, ce qui peut susciter de forts gradients horizontaux de vitesse caractérisés par le rapport $(U_2-U_1)/\Delta y$. Plus ce rapport est élevé, plus le piéton doit s'adapter rapidement et plus la gêne augmente. Les forts gradients horizontaux de vitesse prennent un rôle aigu pour la gêne du piéton, essentiellement si ce dernier se déplace.
- Les turbulences créant un flux de vent ascendant.



2.3.3 Les critères quantitatifs du confort respiratoire à l'extérieur

La pollution atmosphérique constitue l'une des préoccupations majeures de ce début de siècle. Elle n'a cependant pas les mêmes effets sur l'homme et sur l'environnement selon qu'elle est locale, régionale ou mondiale.

1/ L'échelle locale caractérise les problèmes de pollution que l'on rencontre au voisinage des sources de rejets : sites industriels, axes de circulations... Ces sources sont à l'origine de pollutions primaires présentant des risques pour la santé humaine, voire des nuisances olfactives. Parmi ces polluants primaires on peut citer: le monoxyde de carbone, les hydrocarbures imbrûlés, les oxydes d'azote, les particules en suspension, le dioxyde de soufre...

2/ La pollution régionale est due à la dispersion des polluants à plusieurs centaines de kilomètres des sources d'émission. Leur action dépend des conditions météorologiques (pluies, vents, ensoleillement).

3/ La pollution mondiale ou pollution globale est à l'origine de problèmes planétaires tels que la destruction de la couche d'ozone à haute altitude ou l'accroissement de l'effet de serre, susceptible d'occasionner un réchauffement de la Terre, accompagné d'effets climatiques indésirables.

La qualité de l'air est importante pour le confort et la santé des citoyens. Les polluants globaux, tels que les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , O_3), inquiètent par leurs conséquences néfastes sur l'équilibre climatique de la planète. Les pollutions régionales et locales (SO_2 , NO_2 , PM) constituent des menaces

directes sur la santé et le bien-être, en particulier dans les grandes agglomérations. Pour diminuer la pollution atmosphérique, il faut limiter les consommations d'énergie et réduire les sources de pollution en ville.

Une partie de la pollution atmosphérique est créée au niveau des toits: elle correspond aux émissions des cheminées des bâtiments (habitations + industrie). Ces émissions ont fortement diminué dans les pays occidentaux depuis 1950. A l'heure actuelle, dans beaucoup de villes européennes, le premier problème de pollution de l'air est créé par les automobiles. En revanche dans les pays en voie de développement, la pollution urbaine est surtout générée par le chauffage des bâtiments et le fonctionnement de leurs industries (Limb 1999).

Les nouvelles normes européennes qui doivent être appliquées en 2005-2010 donnent les limites suivantes de concentration des polluants dans l'air. Ces limites ont été établies sur base de l'impact des polluants sur la santé humaine (IBGE 2002).

Polluant	Type de concentration	Valeur de la norme
SO ₂	Horaire	350 µg/m ³
	Journalière	125 µg/m ³
NO ₂	Horaire	200 µg/m ³
	Annuelle	40 µg/m ³
PM10	Journalière	50 µg/m ³
	Annuelle	20 µg/m ³
Pb	Annuelle	0.5 µg/m ³
O ₃	8h-max	120 µg/m ³
CO	8h	10 µg/m ³
Benzène	Annuelle	5 µg/m ³

Presque tous les citoyens européens (97%) sont exposés à des niveaux de pollution de l'air non conformes aux objectifs de qualité de l'Union Européenne pour les particules, 44% à des niveaux d'ozone atmosphérique excessifs, 14% à de trop fortes concentrations de NO₂. La circulation automobile est une des principales sources de ces polluants atmosphériques. (CEE 2004) A Bruxelles, le transport automobile est le responsable principal de l'état de la qualité de l'air urbain (IBGE 1999).

Les pointes de pollution dépendent de l'influence du climat : en général, les maxima se produisent lors d'épisodes anticycloniques froids et sans vent. Les conditions météorologiques ont un impact majeur sur la qualité de l'air : les vents emportent et dispersent les polluants atmosphériques, les pluies les diluent, les inversions thermiques les bloquent. Les émissions de polluants varient, selon les sources, en fonction des saisons. Les émissions dues au trafic routier ont lieu toute l'année, contrairement à celles dues au chauffage, évidemment beaucoup plus marquées en hiver. C'est en hiver également que le risque d'inversion thermique des couches d'air dans l'atmosphère, qui bloquent la dispersion des polluants, est le plus élevé. En été par contre, en raison de l'accroissement de la durée d'ensoleillement, c'est l'ozone (lié au trafic automobile) qui devient le polluant le plus préoccupant.

Une étude effectuée sur la dispersion du monoxyde de carbone produit par des voitures dans des rues donne la conclusion suivante : si l'accumulation des polluants dépend de la géométrie de la rue, la vitesse du vent est le facteur prédominant pour sa dispersion. Pour obtenir une bonne ventilation, il est donc

nécessaire d'avoir des mouvements d'air d'au moins 2m/s à la hauteur des toits. (Mc Cormick 1971)

D'autres études de De Pauh, Shieh, Nakamura, Oke, Yamartino et Wiegand qui ont tous travaillé avec une morphologie urbaine de rues dont le rapport hauteur/largeur variait entre 1 et 1.5, obtiennent des valeurs proches de **2m/s** comme limite de la vitesse du vent au-dessus des toits pour créer une circulation d'air à l'intérieur de la rue qui dépende du flux du vent, quelque soit l'orientation de la rue. Pour des vitesses de vent inférieures, les effets thermiques et mécaniques deviennent prépondérants. (Santamouris & al. 2001)

On peut donc en conclure qu'une vitesse de vent de 2m/s au-dessus des toits serait le minimum nécessaire pour assurer une bonne ventilation des rues.

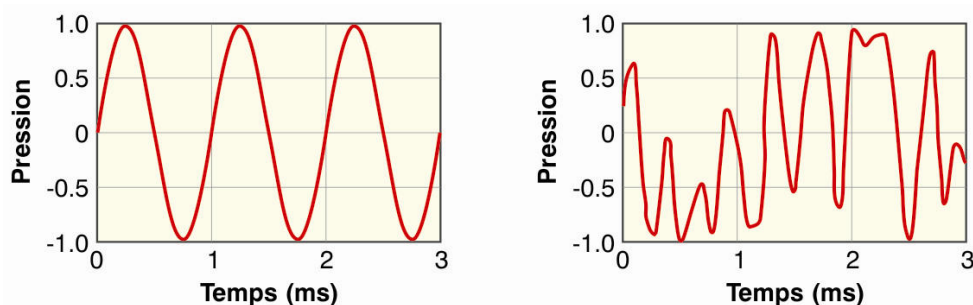
Des vents de 2 à 5 m/s pourraient donc allier les deux nécessités urbaines que sont le confort pour les piétons et la dispersion de la pollution automobile. Cette conclusion n'entre donc pas en conflit avec les valeurs fixées pour le confort des piétons mais elle rend la gamme des vitesses de vent acceptables plus réduite dans le cas de rues qui présentent un risque de pollution atmosphérique important (à cause d'une circulation importante).

2.3.4 Les critères quantitatifs du confort acoustique à l'extérieur

Le confort acoustique est influencé par le niveau sonore et la qualité des ambiances sonores. L'environnement acoustique nous procure une sensation de confort quand nous pouvons entendre les sons de l'environnement qui nous entoure, nettement et sans fatigue, dans une ambiance sonore agréable.

Du point de vue quantitatif de la gêne sonore en ville, nous allons analyser les seuils conventionnels fixant la limite entre le bruit acceptable et le bruit insupportable. Ces valeurs quantitatives sont choisies pour les bruits habituels de la ville et non pour des bruits exceptionnels ou momentanés (fêtes, chantiers, cortèges,...).

Le son est une sensation auditive produite par une variation rapide de la pression de l'air. L'origine de cette variation est engendrée par la vibration d'un corps qui met en vibration l'air environnant. Ainsi est créée une succession de zones de pression et de dépression qui constituent l'onde acoustique. Un son pur est la sensation auditive produite par une variation sinusoïdale de la pression de l'air (figure ci-dessous à gauche). Un bruit est le résultat d'une variation aléatoire de la pression (figure ci-dessous à droite).



(Roulet 2002)

La fréquence est le nombre de cycles complets qu'un phénomène vibratoire effectue en une seconde. Elle s'exprime en périodes par seconde ou Hertz (Hz). La fréquence des sons audibles va de 16 à 16000 Hz. Un son aigu a une haute fréquence et un son grave une basse fréquence. Le spectre d'un son (amplitude de la variation de pression en fonction de la fréquence de la variation) est formé d'une seule raie, à la fréquence du son. Le bruit est un mélange de sons, toutes les fréquences sont représentées.

La puissance physique des sons, exprimée en unités de pression sur le tympan, varie de 0 à plusieurs milliards. Ces valeurs de pression ne correspondent pas à nos sensations subjectives, beaucoup moins contrastées. C'est pourquoi les acousticiens ont créé le **décibel (dB)**, qui traduit la puissance des sons selon une **échelle logarithmique**. Un décibel est le logarithme du rapport entre la puissance d'un son émis et celle d'un son de référence. La formule est : $L=10 \log (P/P_0)^2$ (en dB) avec $P_0 = 2.10^{-5}$ Pa (pression de référence).

Commode pour les techniciens, cette unité est malheureusement très étrangère au sens commun. Quand on cite des chiffres de niveaux sonores, il ne faut jamais oublier que l'on ne manipule pas des valeurs arithmétiques se prêtant aux opérations simples (addition, division, etc.), mais des valeurs logarithmiques ! Ainsi, une augmentation de 3 décibels correspond au doublement de la puissance d'un bruit. Cette mise en garde est d'autant plus nécessaire que les sonomètres, qui sont les instruments de mesure utilisés pour évaluer les niveaux sonores, convertissent automatiquement la puissance des sons en décibels, sans qu'apparaisse la nature logarithmique des chiffres obtenus.

Malgré sa complexité liée à son échelle logarithmique, le décibel est le seul instrument d'objectivation accepté de manière générale en acoustique; il faut donc s'en contenter.

Si nous avons n sources sonores qui ne sont pas corrélées, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de phénomènes d'interférence entre les différents signaux, nous obtenons le niveau sonore global suivant :

$$L_p = 10 \log 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}} \quad \text{pour n sources}$$

En pratique, cependant, il suffit de retenir que lorsque l'intensité acoustique double, le niveau sonore augmente de 3 dB ($10 \log 2 = 3$), ce qui correspond à la limite de perception de l'oreille humaine ; le niveau sonore acoustique augmente de 7 dB si elle quintuple ($10 \log 5 = 7$) et de 10 dB si elle décuple ($10 \log 10 = 10$), cette dernière situation étant vécue comme un bruit deux fois plus fort.

D'autre part, lorsque la différence arithmétique entre deux niveaux sonores est égale ou supérieur à 10 dB, le niveau total est pratiquement (à moins de 0.5 dB près) égal au niveau le plus élevé. Concrètement, cela signifie que, le bruit le plus faible est masqué par le bruit le plus élevé. Cela n'est vrai auditivement que si les deux bruits sont de même contenu fréquentiel ; par contre, un sifflement à haute fréquence restera audible en présence d'un bruit de basses fréquences beaucoup plus élevé, du fait de la discrimination fréquentielle de l'oreille. L'oreille humaine est en effet moins sensible aux basses fréquences qu'aux hautes fréquences.

Ainsi, deux sources (sans liaison harmonique) de 50 dB produisent un niveau sonore résultant de 53 dB, alors qu'une seule source de 40 dB et une autre de 50 dB donnent un niveau de pression sonore résultant d'environ 50 dB.

Le bruit de fond est le bruit résultant du mélange des différents bruits présents de manière continue sur le lieu étudié. C'est donc une caractéristique essentielle de l'ambiance sonore de ce lieu.

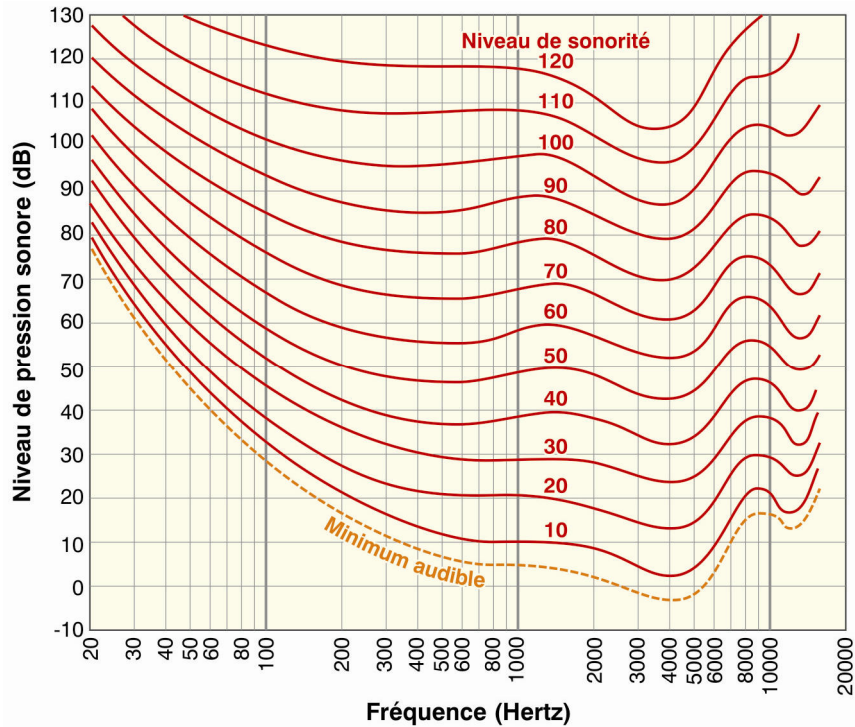
Un son est entendu dans un lieu quelconque quand deux conditions sont réunies : son niveau sonore doit être supérieur au seuil d'audibilité et avoir un niveau égal ou supérieur au niveau de bruit de fond. Certains sons de niveau légèrement inférieur au bruit de fond peuvent être perçus.

Voici quelques exemples de **niveaux sonores caractéristiques**.

Niveau	Impression	Effets	Exemples
130 dBA	Très douloureux	Lésions irréversibles du système auditif	Banc d'essai de réacteur
120 dBA	douloureux		Avion sur l'aire d'envol
110 dBA	insupportable	Perte d'audition après une brève exposition	Atelier de tôlerie
100 dBA	Difficilement supportable		Atelier de presses, discothèque
90 dBA	Très bruyant	Perte d'audition après une longue exposition	Poids lourd à 3 m
80 dBA	bruyant		Réfectoire scolaire, aspirateur
70 dBA	acceptable	Gamme de bruits et sons parfaitement supportables	Forte conversation
60 dBA	Bruit courant		Rue bruyante
50 dBA			Bureau
40 dBA	faible		Radio à faible niveau
30 dBA	calme		Zone résidentielle calme, bruissement des feuilles
20 dBA	Très calme		Pièce très protégée : studio de radio
10 dBA	silence		L'observateur entend le bruit de son propre organisme
0 dBA	Silence absolu		

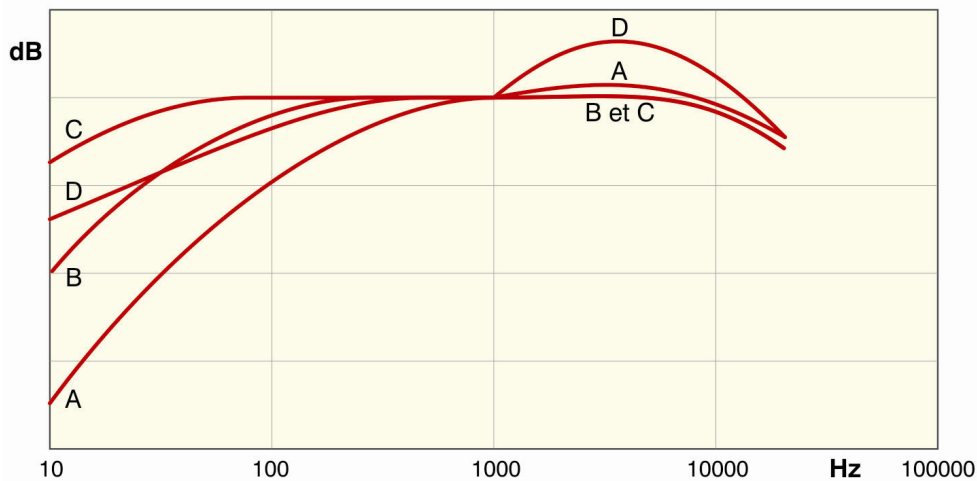
Il y a une différence entre la puissance physique d'un son et notre perception du même son. La puissance sonore est la mesure physique exprimée en dB. En exprimant les niveaux sonores en décibels, on admet que la sensation auditive varie comme le logarithme de la puissance des sons. C'est une hypothèse très imparfaite. Notamment le tympan n'est pas affecté de la même façon par les sons graves et les sons aigus. On appelle sonie la perception de la puissance sonore. La perception de l'oreille est extrêmement complexe car elle dépend de façon non linéaire aussi bien de la fréquence que du niveau sonore.

Fletcher et Munson ont établi un graphe qui représente la perception des sons par l'oreille humaine. Le diagramme de Fletcher-Munson, donné ci-dessous, provient d'une étude réalisée dans les années 30 sur un grand nombre de personnes humaines âgées de 18 à 25 ans. Ce graphique représente notre sensibilité aux différentes fréquences. Lorsque les fréquences diminuent, les courbes d'égale sonie se rapprochent de plus en plus. Cela veut dire que les basses fréquences ne sont perçues que pour des niveaux sonores plus élevés mais que l'oreille humaine est plus sensible à des variations de sons au niveau des basses fréquences qu'au niveau des hautes fréquences.



Graphes de Fletcher et Munson (Blasco 2002).

Des courbes de correction s’approchant aussi bien que possible des caractéristiques de l’ouïe ont été établies pour que les instruments de mesure (sonomètres) quantifient le plus objectivement possible le bruit perçu par l’oreille humaine : ce sont les courbes de pondération en fréquences qui sont désignées par les lettres A, B, C et normalisées. Ces courbes correctrices sont représentées ci-dessous.

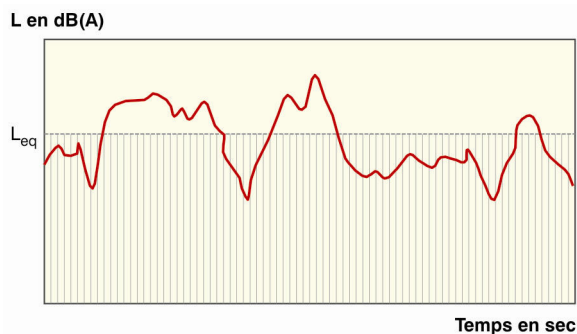


(Blasco 2002).

A l’origine, chacune de ces pondérations avait son domaine d’application plus ou moins bien défini : le filtre A pour les bruits faibles et les filtres B et C pour les niveaux plus élevés. A l’heure actuelle, seule la courbe A est utilisée pour la mesure des nuisances sonores. Le niveau sonore mesuré avec la courbe de pondération en fréquence A s’appelle le niveau sonore pondéré A. Il est noté L_A ou L et son unité est le dBA.

En milieu urbain, le niveau sonore varie généralement dans le temps. Lorsque le niveau sonore fluctue en fonction du temps, on remplace ce niveau variable par un niveau moyen de même contenu énergétique que le niveau variable pendant une durée de mesure T : le niveau équivalent de pression sonore (exprimé en dB(A)).

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad \text{en dB(A)}$$



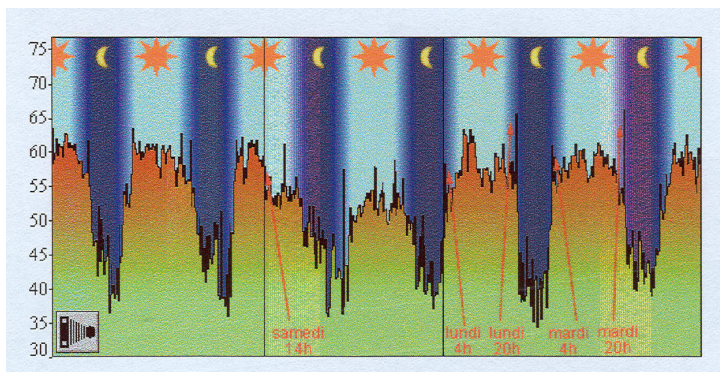
(Sémidor 2005).

Les niveaux statistiques de pression sonore ($L_{Ax,T}$) sont les niveaux sonores qui sont dépassés pendant x % de la période T; ces niveaux statistiques sont généralement calculés pour 5%, 10%, 50% et 90%. Le bruit de fond est la moyenne des mesures effectuées pendant 90% du temps d'observation (L_{A90}).

Pour être représentative, la mesure du L_{eq} doit être faite sur une période de temps suffisamment longue :

- 6h à 22h et 22h à 6h pour respecter la réglementation actuelle,
- 1h si le bruit varie peu dans la journée ou dans la nuit,
- 1 s pour les phénomènes particulièrement stables dans le temps.

La mesure du bruit de fond est une information complémentaire indispensable : il traduit le seuil en dessous duquel le niveau de bruit ne peut pas descendre (silence relatif). Dans la situation présentée ci-dessous, on voit par exemple que le bruit de fond nocturne est de 35 dB(A) alors que le bruit de fond diurne est de 50 dB(A).

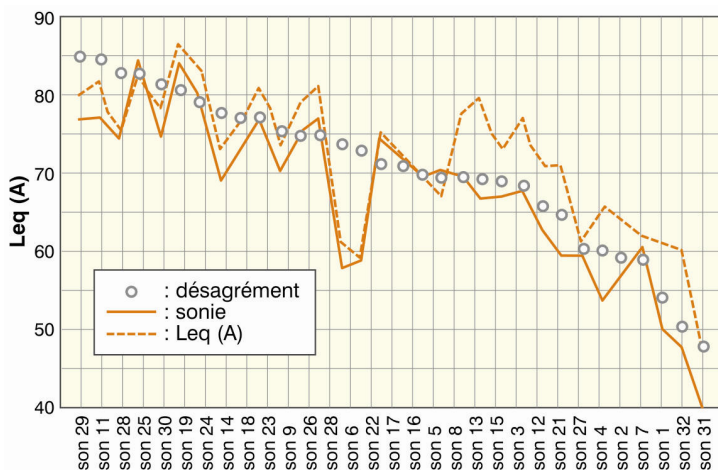


(Sémidor 2005).

Le paramètre perceptif qui intervient principalement dans la gêne sonore est la sonie. On peut définir la sonie comme l'intensité d'un son telle qu'on la perçoit, on parle souvent d'intensité subjective. Bien évidemment, la sonie dépend principalement du niveau sonore. Mais elle dépend aussi de la fréquence du son, de sa durée et de phénomènes de masquages fréquentiels et temporels. C'est pour cela que le décibel ne suffit pas à la décrire... La sonie se mesure en phones ou sones.

Le phone correspond au niveau d'un son pur de 1 kHz qui aurait la même sonie que le son qu'on analyse. Un sone est la sonie d'un son pur de 1 kHz à 40 dB.

Le graphe ci-dessous est le résultat d'une expérience qui compare le désagrément, la sonie et le niveau équivalent des sons de l'environnement (Meunier 2001). On voit que la sonie est légèrement plus proche de la courbe de désagrément que le niveau équivalent en dB(A) mais que celui-ci reste une bonne approximation de l'impression de gêne produite par l'environnement sonore.



(Meunier 2001).

Les principales **limites acoustiques** généralement admises sont :

- le seuil de la douleur situé à **120 dBA** ;
- le seuil de graves dommages auditifs pour une exposition à un bruit permanent pendant une durée prolongée (8h/jour) : vers **90 dBA**
- le seuil de danger pour l'appareil auditif exposé à un bruit permanent pendant une durée prolongée : vers **75 dBA** ;
- le seuil de la "conversation paisible" : vers **50 dBA**
- le seuil de perturbation du sommeil : vers **40 dBA**
- le seuil du "silence" : vers **20 dBA** (le silence absolu est une situation totalement artificielle).

Par ailleurs, si une personne est soumise à un niveau de bruit élevé, un certain nombre de problèmes de santé peuvent apparaître : stress, énervement, trouble du sommeil, diminution des performances intellectuelles ou de la concentration, et parfois même risque d'infarctus. Bien qu'il soit difficile d'établir une corrélation directe et univoque entre le niveau de bruit et les perturbations de santé ou encore la qualité de vie, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande, dans une optique idéale de protection des populations et de leur habitation, les niveaux sonores suivants.

Recommandations OMS	Jour Intérieur (repos)	Jour Extérieur	Nuit Intérieur	Nuit Extérieur
Valeur guide - $L_{Aeq, 8h}$	30 dB(A)	50 dB(A)	30 dB(A)	45 dB(A)
Valeur à ne pas dépasser $L_{Aeq, 8h}$		55 dB(A)		
Valeur maximale $L_{A, max}$			45 dB(A)	

Ces valeurs représentent un idéal. Néanmoins, elles ne sont pas applicables à l'heure actuelle en ville.

Le tableau ci-dessous donne les seuils de gêne couramment employés à Bruxelles (IBGE 1998).

Trafic routier	Période du jour (08-20h) $L_{Aeq,t} < 60$ peu gênant $60 < L_{Aeq,t} < 65$ gênant $65 < L_{Aeq,t}$ très gênant	Période nuit (20h- 8h) $L_{Aeq,t} < 57$ peu gênant $57 < L_{Aeq,t} < 60$ gênant $60 < L_{Aeq,t}$ très gênant
Tafic ferroviaire	Jour (8h- 20h) $L_{Aeq,t} = 60$ Eveil et soir (6-7h + 19-22h) : $L_{Aeq,t} = 55$	Nuit (22h-6h) : $L_{Aeq,t} = 50$

La Région de Bruxelles-Capitale a déterminé des seuils limites à partir desquels une intervention est nécessaire pour protéger les populations résidentielles (IBGE 1998).

Valeurs choisies par la Région de Bruxelles-Capitale	Jour $L_{Aeq,8h}$	Jour $L_{Aeq,8h}$	Nuit $L_{Aeq,8h}$	Nuit $L_{Aeq,8h}$
	Intérieur (repos)	Extérieur	Intérieur	Extérieur
Seuil d'intervention	45 dB(A)	65 dB(A)	40 dB(A)	60 dB(A)

Ce sont ces valeurs de niveaux sonores équivalents que nous prenons comme limite du point de vue quantitatif de la gêne sonore en ville. Le bruit doit donc être limité dans les espaces publics à une valeur de 65 dB(A) en journée et à une valeur de 60 dB(A) la nuit. D'autres études valident ce choix plus réaliste d'une limite maximale de 65 dB(A) dans les espaces publics urbains (Kang & al 2004).

A Bruxelles, près de 28% de la population est soumise à un niveau de bruit du trafic routier supérieur à 65 dB(A). Les raisons sont multiples : charge de trafic importante, vitesses des véhicules excessives, mauvais état de certaines routes,... Les espaces verts et les places publiques, qui devraient être des zones calmes et protégées, sont en fait très exposés aux nuisances sonores générées par le trafic dans les rues et les boulevards qui les longent. Des mesures réalisées pendant la journée européenne « en ville sans ma voiture » traduisent une diminution moyenne pour l'ensemble des espaces publics tant de la gêne que du bruit de fond de 5 décibels, ce qui est distinctement perceptible par l'oreille humaine, lorsque le trafic est fortement limité en ville.

A Bruxelles, comme dans la majorité des villes européennes, la circulation routière apparaît nettement comme la première source de bruit en zone urbaine. L'analyse des résultats révèle également comme nuisance importante, le bruit des avions ainsi que le trafic ferroviaire. Il est à souligner que ces sources de bruit sont étroitement liées à d'importantes préoccupations urbaines : la mobilité, la sécurité et la pollution atmosphérique.



Circulation à Rome. (Photo : S. Reiter).

2.3.5 Les critères quantitatifs du confort visuel à l'extérieur

Le confort visuel est influencé par la quantité, la distribution et la qualité de la lumière. L'environnement visuel nous procure une sensation de confort quand nous pouvons voir les choses et les êtres qui nous entourent, nettement et sans fatigue, dans une ambiance colorée agréable. Un bon éclairage doit garantir à l'habitant qu'il puisse exercer ses activités le plus efficacement possible, en assurant son bien-être et en lui apportant un certain agrément visuel.

La lumière constitue un élément essentiel, générateur de vie sur terre. Elle représente une partie indéniable de notre vécu quotidien et nous influence du point de vue physiologique et psychologique. Elle est au cœur même de la définition du geste créateur: exprimer, c'est-à-dire mettre en lumière, extraire de l'ombre. La lumière révèle des sensations qui nous permettent de qualifier l'espace que nous traversons. La composante psychologique de la lumière s'avère un facteur prépondérant de notre impression de bien-être. L'utilisation de la lumière n'est jamais neutre car elle engendre toujours l'un ou l'autre type d'ambiance, même lorsque ce n'est pas volontaire. Dès lors, il est indispensable de tenir compte des implications sensorielles, symboliques et psychologiques de la lumière.

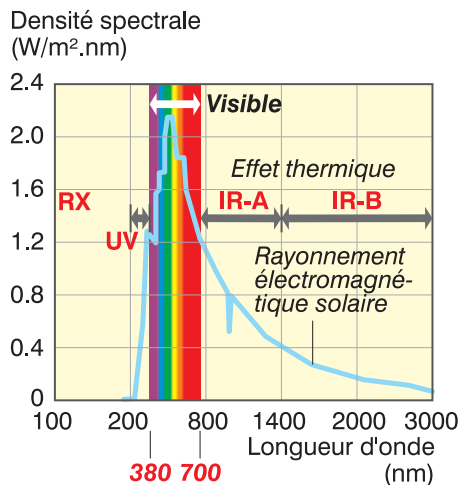


(Reiter & De Herde 2001)

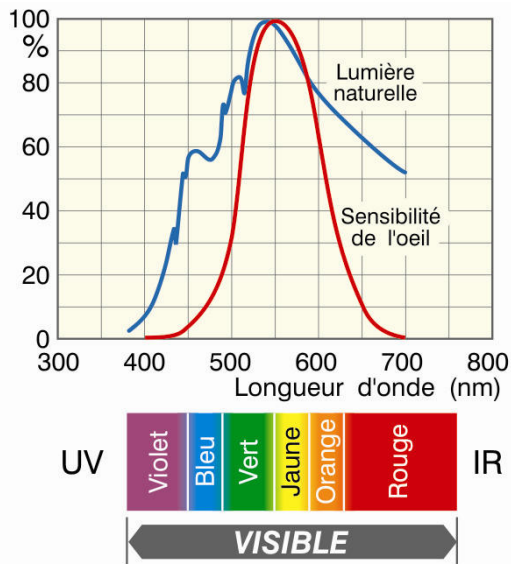


(Photo : S. Reiter)

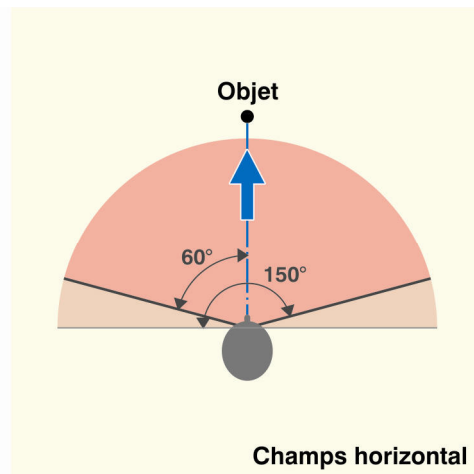
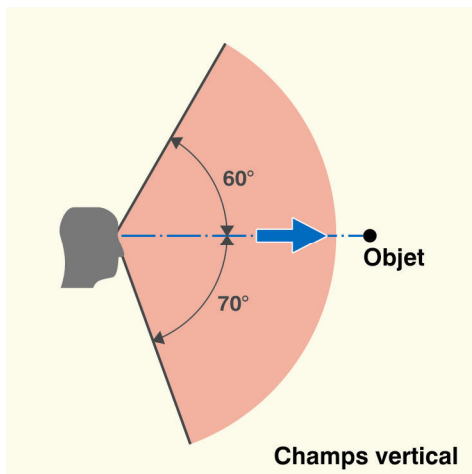
La lumière est une des formes du rayonnement électromagnétique. La figure ci-dessous montre la densité spectrale du rayonnement électromagnétique solaire, c'est-à-dire la puissance du rayonnement par rapport à sa longueur d'onde. Le spectre des longueurs d'onde visibles de la lumière occupe une étroite bande du spectre électromagnétique total. Compris entre 380 et 700 nm, le domaine visible recouvre les longueurs d'onde où l'énergie est la plus intense.



L'éclairage naturel est préféré à l'éclairage artificiel grâce à sa variabilité et à ses nuances. La lumière naturelle est un élément indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu où nous évoluons. Son caractère cyclique est un facteur important pour notre équilibre psychique. De plus, la qualité spectrale de la lumière naturelle assure la meilleure vision possible des objets et des couleurs. La zone visible s'allonge des ondes violettes ($\lambda \cong 380$ nm), en passant par les ondes bleues, vertes, jaunes et orangées, jusqu'aux ondes rouges ($\lambda \cong 700$ nm). Si on compare la répartition spectrale de la lumière naturelle à la courbe de sensibilité de l'oeil, il apparaît que l'oeil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle.



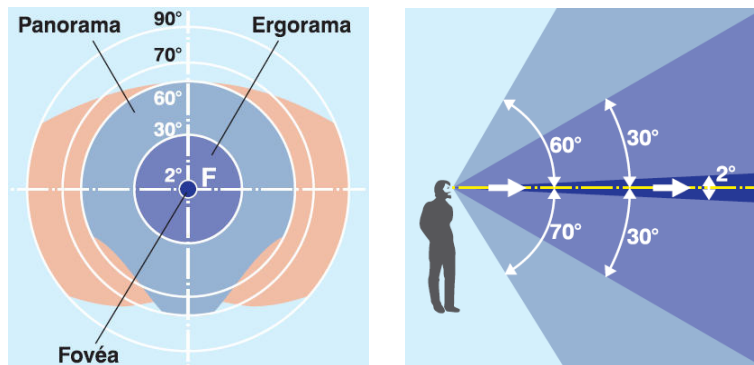
La capacité de l'oeil à saisir une information visuelle dépend de sa position relative dans le champ visuel. Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'oeil, sans bouger la tête. Bien que le champ visuel soit légèrement différent pour chaque individu, la portée verticale des yeux couvre un angle d'environ 130° ; elle est limitée vers le haut par les arcades sourcilières et vers le bas par les joues. Le champ horizontal total des yeux est d'environ 180° lorsqu'ils sont dirigés vers un objet fixe. Chaque oeil a un angle de vision d'environ 150° . A l'endroit où les champs visuels se recouvrent, l'homme a une vision binoculaire; ils se superposent dans la zone médiane, où un même objet est vu simultanément par les deux yeux mais sous un angle différent. C'est grâce au cerveau qui compare les images provenant de nos deux yeux que nous avons l'impression de relief.



Le champ visuel binoculaire se divise en trois zones:

- le champ central de la fovéa, domaine d'1° à 2° d'ouverture centré
- l'ergonoma, domaine de 2 x 30° d'ouverture,
- le panorama, champ dont l'angle horizontal d'ouverture est de 2 x 60° et l'angle vertical respectivement de 60° vers le haut et de 70° vers le bas sur l'axe de la vision.

Les très fins détails ne peuvent être perçus que dans le champ central de la fovéa. L'ergonoma permet de voir les formes. Seuls les mouvements sont perceptibles dans le panorama. Le graphe ci-contre montre en bleu le champ visuel perçu simultanément par les deux yeux et en rose clair le domaine vu par chaque oeil séparément. Les cercles concentriques délimitent la fovéa, l'ergonoma et le panorama.



Le cerveau joue un rôle important dans notre appréhension de l'espace. Ainsi, pour apprécier les distances, notre cerveau opère une analyse instantanée des différents éléments situés dans notre champ visuel et la confronte à sa perception du relief. Il compare les dimensions des objets; schématiquement, une colonne vue comme plus grosse qu'une autre est immédiatement interprétée comme plus proche. Le cerveau se réfère aussi à des dimensions mises en mémoire par l'expérience, comme la taille 'attendue' d'une personne ou d'une chaise. Il intègre enfin des détails significatifs tels que la situation d'un objet par rapport à ceux qui le jouxtent, sa vision en totalité ou partiellement masquée, sa luminosité, les ombres projetées, la présence de brume,... Grâce à la synthèse immédiate de toutes ces informations, nous situons en permanence l'éloignement des objets qui nous entourent, ou plutôt nous croyons les situer. En effet, le cerveau peut se tromper s'il est mis en présence de caractéristiques inhabituelles de dimensions ou de perspectives. La modification de certains paramètres, dont l'éclairage, peut également l'induire en erreur. Ainsi, dans un environnement obscur, un objet vivement éclairé paraît plus proche. Ces procédés sont bien connus en architecture.

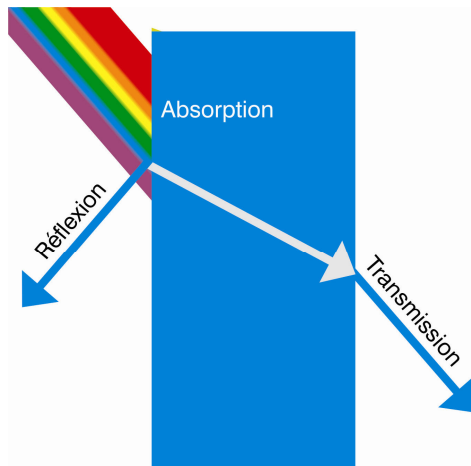


(Reiter & De Herde 2001)



(Reiter & De Herde 2001)

Quelle que soit la couleur de la lumière émise, les objets ne font que l'absorber, la réfléchir ou la transmettre sélectivement. Les effets produits par chacun de ces phénomènes dépendent de la longueur d'onde de la lumière et peuvent donc être à l'origine de la couleur de certains objets.



Ainsi, les arcs-en-ciel proviennent de la décomposition de la lumière blanche en ses différentes composantes colorées au travers des gouttes d'eau car l'angle de réfraction (angle de déviation du rayon lumineux dans un milieu transparent) est d'autant plus grand que la longueur d'onde est plus petite. Ainsi, la lumière bleue est plus déviée que la lumière rouge. S'il n'y avait ni poussières ni gaz dans l'atmosphère, le ciel apparaîtrait noir, comme à environ 16km de la surface de la Terre. La diffusion de la lumière solaire par les molécules d'air est d'autant plus grande que la longueur d'onde de la lumière est courte. Lorsque le soleil est au zénith, le ciel est d'autant plus bleu que l'air est pur ; lorsque le soleil est à l'horizon, les rayons doivent traverser une couche atmosphérique plus grande, la diffusion est alors plus intense et le ciel prend une couleur transmise orangée, complémentaire de la lumière diffusée bleue.



(Reiter & De Herde 2001)



(Reiter & De Herde 2001)

Le **confort visuel** dépend d'une combinaison de paramètres physiques: l'éclairement, la luminance, le contraste et l'éblouissement, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer, le temps disponible pour la vision, la mise en valeur du relief et du modelé des objets. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu tels que son acuité visuelle ou son état d'esprit.

Les objets à percevoir doivent avoir une dimension minimale. Sous les mêmes conditions d'éclairage, un texte peut être parfaitement lisible s'il est suffisamment grand alors qu'un texte écrit en petits caractères deviendra plus difficile à lire. L'oeil humain a besoin d'un minimum de temps pour percevoir un objet présenté. Un objet qui se déplace trop vite est invisible. Ainsi, il est impossible de suivre la trajectoire d'une balle de revolver, son mouvement étant trop rapide.

Jusqu'à un certain point, l'acuité visuelle est favorisée par une augmentation de la luminosité de la tâche visuelle. Une luminance minimale est nécessaire pour une bonne vision des éléments de petite dimension. Des objets qui peuvent être reconnus facilement et dont on peut distinguer aisément les détails peuvent devenir indistincts et même imperceptibles lorsqu'il fait plus sombre ou obscur. Sur la photo ci-dessous, la frise du bâtiment est bien visible lorsqu'elle est exposée au soleil mais disparaît du côté ombragé du bâtiment.



(Reiter & De Herde 2001)

L'éclairement (E) d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu à l'aire de cette surface. Son unité est le lux, équivalent à 1 lm/m².

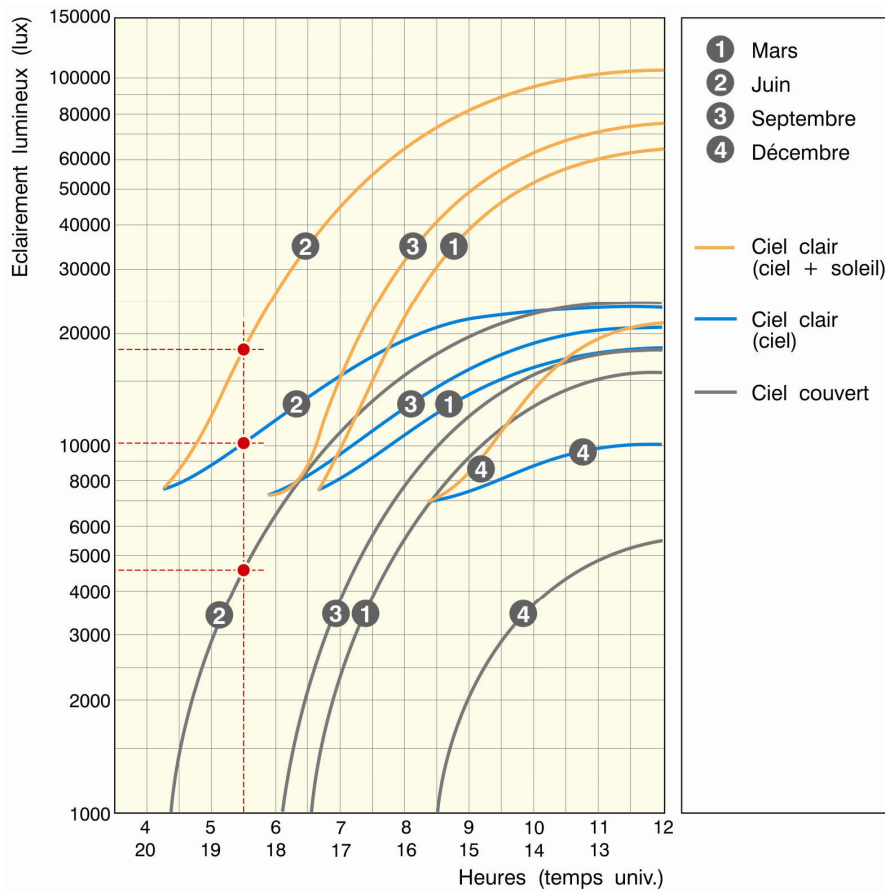
$$E = \Phi / S \text{ (lx)}$$

L'éclairement caractérise donc la quantité de lumière reçue par une surface. Cependant, cette grandeur est très difficilement perceptible par l'oeil humain. De par ses facultés d'adaptation, celui-ci évalue en réalité des différences d'éclairement dans l'espace ou dans le temps. L'échelle des niveaux d'éclairement disponibles naturellement est très étendue: elle varie de 0.2 à 100 000 lx.

Le tableau et le dessin ci-dessous donnent quelques valeurs d'éclairement d'une surface horizontale extérieure. (Reiter & De Herde 2001)

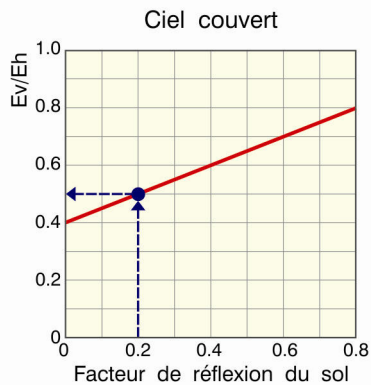
Source lumineuse	Eclairement (lx)	
Pleine lune	0.2	0,2 lux
Ciel couvert	5 000 à 20 000	5 000 - 20 000 lux
Ciel clair (sans soleil)	7 000 à 24 000	100 000 lux
Plein soleil d'été	100 000	

La figure ci-dessous donne l'évolution moyenne horaire de l'éclairage lumineux observé en Belgique sur une surface horizontale, par ciel serein, par ciel clair sans soleil et par ciel couvert, pour quatre mois de l'année.



Ce graphe est construit sur une échelle verticale logarithmique représentant l'éclairage en lux. L'axe horizontal représente différentes heures du jour. On peut vérifier qu'au petit matin, en juin, l'éclairage correspond à environ 4 500 lux par ciel couvert (courbe 2 grise), 10 000 lux par ciel clair sans soleil (courbe 2 bleue) et 18 000 lux par ciel clair avec soleil (courbe 2 orange). Les courbes bleues sont utiles pour les calculs de l'éclairage dû au ciel seul.

L'éclairage lumineux d'une surface verticale dépend de la réflexion lumineuse sur le sol environnant. Le rapport entre l'éclairage lumineux d'une surface verticale (E_v) et d'une surface horizontale (E_h) est donné dans le graphe ci-dessous en fonction du facteur de réflexion du sol, pour un ciel couvert.

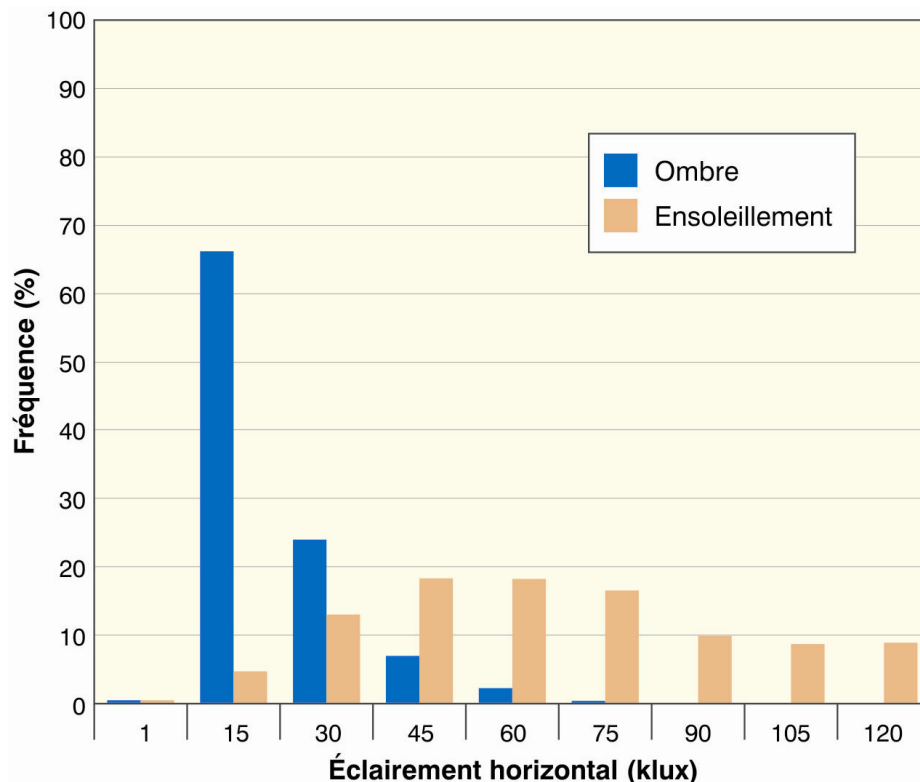


Par exemple, dans un environnement de pelouse dont le facteur de réflexion est 0.2, sous ciel couvert, le rapport E_v/E_h vaut 0.5. En se référant au graphe de l'éclairage lumineux d'une surface horizontale, nous voyons, par exemple, qu'en Belgique au mois de septembre à 8h30univ., $E_h = 10.000$ lx et qu'au mois de juin à 13h univ., $E_h = 24.000$ lx. Nous pouvons, dès lors, déduire l'éclairage sur une surface verticale placée sur cette pelouse, par ciel couvert :

- en septembre à 8h30univ., $E_v = 10.000 \times 0.5 = 5.000$ lx.
- en juin à 13 h univ., $E_v = 24.000 \times 0.5 = 12.000$ lx.

Qu'en est-il des niveaux d'éclairage à assurer dans les espaces publics extérieurs ? Il est communément admis que pour des tâches visuelles usuelles, les niveaux d'éclairage requis pour une perception visuelle confortable vont de 100 à 1000 lux selon la taille des détails géométriques qui doivent être perçus, avec des niveaux d'éclairage nécessaires plus élevés pour des détails plus fins.

Le schéma ci-dessous représente la distribution des niveaux d'éclairage diurnes observés sur deux espaces ouverts situés à Fribourg (Suisse). Ces mesures ont été prises sur deux semaines de chaque saison. Les bornes supérieures des intervalles de niveaux d'éclairage figurent sur l'axe horizontal. Des distributions semblables ont été observées dans d'autres lieux en Europe. Ce schéma montre clairement que les niveaux diurnes d'éclairage horizontal enregistrés sur des espaces ouverts dépassent presque toujours 1000 lux, même à l'ombre (Compagnon & Goyette-Pernot 2004).



(Compagnon & Goyette-Pernot 2004).

Ainsi, toutes les tâches visuelles courantes peuvent être généralement accomplies avec aisances dans les espaces publics urbains. Les niveaux d'éclairage des espaces ouverts peuvent toutefois devenir insuffisants à l'aurore, au crépuscule ou sur quelques zones spécifiques (canyon très profond, auvent de grande taille,...).

La photo ci-dessous montre un exemple de galerie étudiée du point de vue de la lumière naturelle afin d'apporter un éclairage suffisant tout au long de son parcours. Les puits de lumière créés dans le toit de la galerie apportent un complément d'éclairage naturel par rapport à la lumière qui vient de la rue. De plus, ce complément d'éclairage naturel limite les contrastes de luminance trop importants entre les surfaces de cette galerie et les surfaces adjacentes exposées au soleil direct.



Galerie éclairée naturellement par des puits de lumière. (Photo : S. Reiter).

Les usagers des espaces ouverts apprécient spécialement les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. De telles zones peuvent être considérées comme formant le « noyau » d'un espace ouvert. Le « noyau » est très sensible à la hauteur des bâtiments environnants. Par exemple, dès que le rapport hauteur/largeur d'un canyon urbain dépasse la valeur de 0.5, son noyau disparaît entièrement. (Compagnon & Goyette-Pernot 2004).

Il est également important de souligner que la proportion idéale d'ensoleillement d'un espace ouvert est de 20% à 80% de la surface du site (Compagnon & Goyette-Pernot 2004).



Zones ensoleillées et ombragées (Photo : S. Reiter).

Evidemment, **l'éclairage artificiel** des espaces publics en soirée et pendant la nuit est réellement un paramètre important du confort visuel des piétons. Les plans lumière sont donc effectivement un moteur de revitalisation de l'urbain. L'éclairage artificiel des espaces publics est un des domaines qui ouvre à la possibilité de créer des ambiances urbaines de qualité. Il est important de prendre en compte les implications de l'éclairage artificiel des espaces publics sur ses

consommations d'énergie, le confort des piétons en soirée ainsi que le sentiment de sécurité qui est conféré à ces lieux.

Pour ce qui a trait à la conception de la « mise en lumière » nocturne de nos villes, il s'agit d'un domaine qui s'écarte un peu de mon sujet d'étude ; le contexte de ce doctorat ne permet pas d'entrer en détail dans cette problématique complexe mais il serait extrêmement intéressant de pouvoir étudier ce domaine en profondeur dans une recherche ultérieure. Je me contenterai ici de citer deux exemples de réalisations remarquables :

- la ville de Lyon dont le premier plan lumière constitue une œuvre pionnière de grande qualité et qui renouvelle aujourd'hui son plan lumière pour l'intégrer dans le concept de développement durable.



(Photo : S. Reiter)



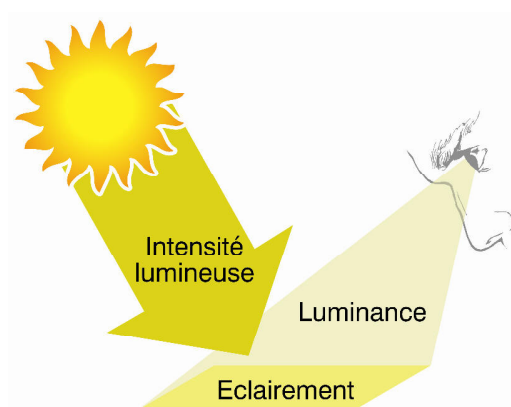
(Photo : S. Reiter)

- La ville de Mons, première commune wallonne à bénéficier d'un plan lumière. Son auteur, l'architecte-urbaniste Jean-Pierre Majot avait pris le parti de diminuer le niveau d'éclairage malgré les reproches des riverains qui exprimaient un sentiment d'insécurité. Réalisé grâce à une réflexion globale sur la ville, sur le patrimoine et les cheminements, le plan lumière de Mons a finalement rencontré la satisfaction de tous. Et depuis lors, les problèmes de vandalisme et d'agression ont disparu à Mons.

Pour plus de détail sur cette problématique essentielle, je vous recommande l'ouvrage de Roger Narboni sur ce sujet : « La lumière urbaine ». (Narboni 1995)

La **luminance** (L) d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source lumineuse dans la direction considérée. La luminance s'exprime en candélas par mètre carré (cd/m²).

$$L = I / S_{\text{apparente}} \text{ (cd/ m}^2\text{)}$$



La luminance caractérise donc le flux lumineux quittant une surface vers l'œil de l'observateur. Elle s'exprime en candélas par m². La luminance est la grandeur photométrique qui correspond le mieux à la sensation visuelle de luminosité d'une

surface. L'œil humain perçoit des niveaux de luminance allant de 0.001 cd/m² (vision nocturne où la perception des couleurs est impossible) à 100 000 cd/m². Par contre, l'œil n'est pas sensible à des variations de luminances inférieures à 20 % : il ne peut que comparer et non mesurer des sensations lumineuses. Le tableau ci-dessous donne des ordres de grandeur de luminances de différents environnements. (Reiter & De Herde 2001)

Environnement	Luminance (cd/m ²)
Paysage nocturne (limite de la visibilité)	0.001
Paysage par pleine lune	0.01 à 0.1
Surface noire mate éclairée par 100 lux	1.5
Parois intérieures éclairées	25 à 250
Surface blanche mate éclairée par 100 lux	30
Paysage par ciel couvert	300 à 5 000
Paysage par ciel clair	500 à 25 000
Lune	2500
Surface blanche au soleil	25 000
Soleil	1,5.10 ⁹

La luminance d'une surface dépend de l'éclairement de cette surface, de son coefficient de réflexion et de sa brillance. Dans le cas d'une surface parfaitement diffusante, éclairée de façon uniforme, la luminance est proportionnelle au facteur de réflexion de cette surface (ρ) et à l'éclairement qu'elle reçoit. Par exemple, un papier blanc mat offre une luminance 20 fois plus importante que celle d'un papier noir mat recevant le même éclairement, parce que le facteur de réflexion du papier blanc est 20 fois plus important que celui du papier noir.

Le **facteur de réflexion** (ρ) d'une surface est la quantité d'énergie lumineuse qu'elle réfléchit par rapport à celle qu'elle reçoit. Une surface dont le facteur de réflexion est élevé réfléchit beaucoup la lumière et apparaît claire. Une surface dont le facteur de réflexion est faible réfléchit peu la lumière et apparaît sombre. Les tableaux ci-dessous donnent les valeurs du facteur de réflexion de quelques revêtements de sol et de différents matériaux de construction. (Reiter & De Herde 2001)

Revêtements de sol		Matériaux de construction	
Type	Facteur de réflexion	Type	Facteur de réflexion
Pelouse	0.18 à 0.23	Vitrage	0.08 à 0.4
Herbe sèche	0.28 à 0.32	Brique rouge	0.05 à 0.2
Sable	0.09 à 0.55	Béton neuf	0.4 à 0.5
Plan d'eau ($h_{\text{soleil}} = 40$ à 10°)	0.1 à 0.47	Béton vieux	0.005 à 0.15
		Ciment	0.2 à 0.4
Prairie	0.14 à 0.18	Ardoises	0.1 à 0.15
Arbre feuillu	0.15	Aluminium	0.55 à 0.75
Conifère	0.05	Tôles de zinc	0.08 à 0.2
Terre	0.26	Asphalte	0.08 à 0.12
Macadam	0.18	Nickel	0.48 à 0.63
Gravier	0.15 à 0.35	Cuivre	0.48 à 0.5
Neige	0.8 à 0.9	Chrome	0.52 à 0.7

Les photos ci-dessous présentent deux exemples d'architecture contemporaine dont les coefficients de réflexion du sol et des façades dans le premier cas et les coefficients de réflexion du sol et des auvents dans le second cas sont élevés mettant en valeur la lumière naturelle.

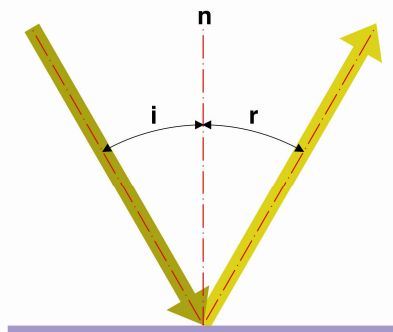


Architecte: Louis I. Kahn.
(Photo: L. Korkmaz)

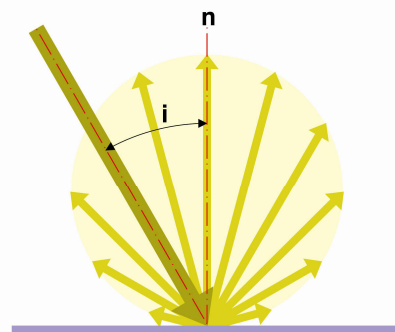


Architecte: Mies van der Rohe.
(Photo: S. Reiter).

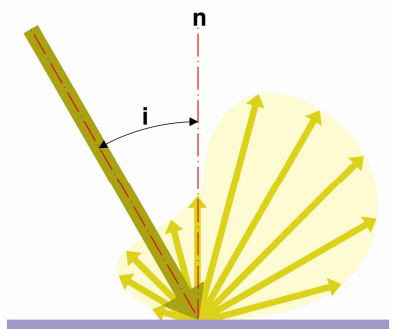
Il existe quatre modes de réflexion de la lumière sur une surface : la réflexion spéculaire où l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence du rayon lumineux, la réflexion diffuse parfaite où la lumière réfléchie est distribuée dans toutes les directions, la réflexion diffuse quelconque où la lumière se répartit de manière aléatoire, la réflexion mixte : la lumière est réfléchie de manière diffuse mais privilégie quand même une direction précise.



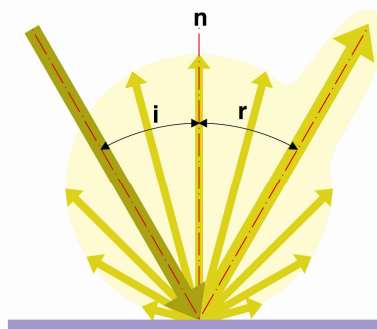
Réflexion spéculaire



Réflexion diffuse parfaite



Réflexion diffuse quelconque



Réflexion mixte

Le mode de réflexion de la lumière sur une surface dépend de sa **brillance**. Une surface spéculaire (miroir ou métal poli) est lisse et parfaitement réfléchissante. La réflexion d'un objet sur une surface spéculaire reproduira l'image inversée de celui-ci. Une surface brillante est lisse et partiellement réfléchissante. Un objet réfléchi sur une surface brillante y dessine sa silhouette. Une surface mate est parfaitement diffusante. Aucun objet ne peut être perçu par sa réflexion sur une surface mate. Le comportement d'une surface satinée correspond à celui d'une surface brillante ou mate selon l'angle d'incidence du rayon lumineux. Si le rayon est rasant, la surface satinée réagit comme une surface brillante. Lorsque l'angle d'incidence diminue, elle se rapproche d'une surface mate.



Surface spéculaire



Surface brillante



Surface mate
(Photos : Reiter & De Herde 2001)



Surface satinée

Il est important de choisir attentivement les facteurs de réflexion et la brillance des matériaux utilisés dans les espaces publics. Par exemple, les pavés blancs de Louvain-la-Neuve ont été choisis pour accroître la luminosité des espaces publics du centre.



La Grand Place de Louvain-la-Neuve. (Photos : S. Reiter).

La photo de gauche ci-dessous montre les réflexions indésirables générées sur les vitrines des magasins (sans filtre polariseur). Notons aussi que la couleur d'une surface brillante est plus intense que celle d'une surface mate.



(Reiter & De Herde 2001)



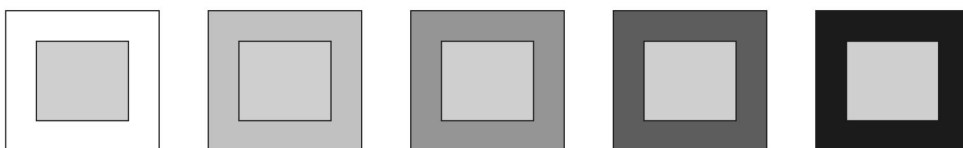
(Reiter & De Herde 2001)

L'architecte peut aussi influencer la couleur apparente de la lumière naturelle par le choix des matériaux et des couleurs des éléments qui vont transmettre et réfléchir la lumière.



(Reiter & De Herde 2001)

Le facteur dominant dans la distinction d'un objet est le contraste de luminances ou de couleurs entre cet objet et son entourage immédiat. Il est plus facile de lire un texte imprimé en noir sur fond blanc qu'en noir sur fond gris. Le contraste des luminances est dans ce cas égal au rapport des coefficients de réflexion de l'encre noir et du support, soit 20/1 dans le premier cas, et de 10/1 à 2/1 dans le second, en fonction du gris utilisé. Par effet de contraste, le rectangle intérieur de la figure ci-dessous paraît plus clair à l'extrême droite qu'à l'extrême gauche, alors qu'ils présentent tous la même couleur en réalité.



Pour voir clairement un objet, il faut un minimum de contraste de luminance ou de couleur entre l'objet et son environnement proche. Ainsi, la structure de la photo ci-dessous est mise en évidence par la clarté du ciel alors qu'elle disparaît devant la masse sombre des arbres.



(Reiter & De Herde 2001)

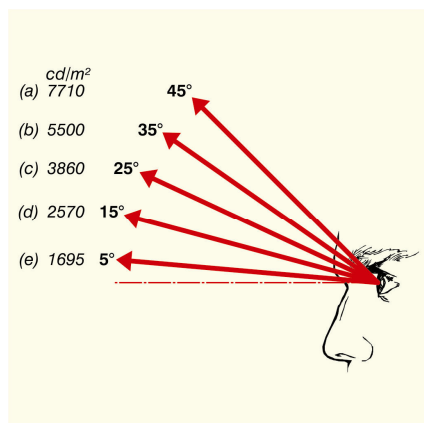
L'**éblouissement** résulte de conditions de vision dans lesquelles l'individu est moins apte à percevoir les objets, suite à des luminances ou à des contrastes de luminance excessifs dans l'espace et dans le temps.

Nous distinguons l'éblouissement direct et l'éblouissement indirect:

- l'éblouissement direct est causé par la présence d'une source lumineuse intense au centre du champ de vision.
- l'éblouissement indirect provient d'une réflexion perturbatrice des sources lumineuses sur des surfaces spéculaires ou brillantes.

L'éblouissement est dû à une luminosité trop intense de surfaces placées dans la direction de la vision ou à un contraste lumineux trop important entre surfaces contiguës. Il place l'individu dans des situations de grand inconfort visuel.

La limite supérieure généralement admise pour la valeur de la luminance absolue d'une surface est de 1500 cd/m^2 . Les valeurs de luminances maximales admissibles sont données dans la figure ci-dessous en fonction de l'angle de vision: plus l'angle formé par l'horizontale et la droite qui relie l'oeil à la source lumineuse augmente, plus la valeur de luminance admissible croît, qu'il s'agisse d'éblouissement direct ou indirect. (Reiter & De Herde 2001)

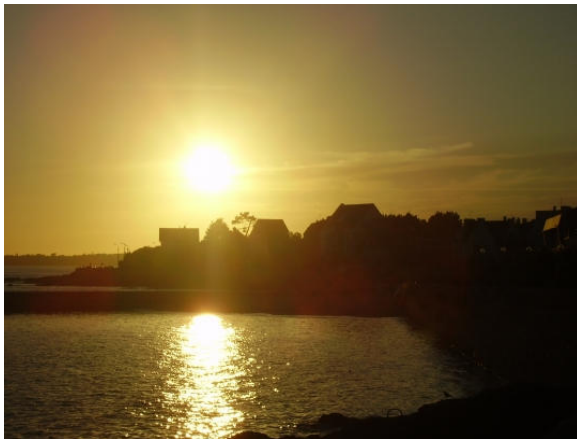


Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'oeil doit s'adapter lorsque la direction du regard change. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter de telles fatigues inutiles, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel. Les valeurs maximales recommandées pour les rapports de luminance sont les suivantes:

Zones du champ visuel	Rapport de luminance maximal
Arrière-fond de la tâche visuelle / entourage	3/1
Arrière fond de la tâche visuelle / champ périphérique	10/1
Source lumineuses / surfaces contiguës	20/1
Ensemble de l'espace	40/1

Les sources d'éblouissement dans un espace public urbain sont:

- la vision directe du soleil,
- la réflexion du soleil sur des surfaces spéculaires ou brillantes,
- un contraste de luminance excessif entre des surfaces adjacentes.



(Photo : T. Dugenetay).

Dans les espaces extérieurs, les problèmes d'éblouissement les plus courants proviennent de surfaces très réfléchissantes, le plus souvent orientées au sud. Nous devons donc faire attention à l'orientation des surfaces à réflexion spéculaire (vitrages réfléchissants, ...). Les surfaces vitrées verticales avec un vitrage clair ne causent un problème d'éblouissement que lorsque le soleil est très bas (lever et coucher du soleil). Par contre, lorsque la façade est inclinée, des problèmes peuvent se produire même lorsque le soleil est haut dans le ciel.



(Reiter & De Herde 2001)



(Reiter & De Herde 2001)

La photo ci-dessous montre une galerie conçue par Louis I. Kahn de manière à éviter les contrastes de luminance trop importants entre les surfaces ombragées de la galerie et la luminosité du ciel. Une zone intermédiaire entre l'extérieur et la partie la plus sombre de la galerie assure la transition visuelle et limite les risques d'éblouissement.



(Photo : V. Mahaut)

A intensité égale, la sensation d'éblouissement produite par une source lumineuse soudaine se révèle plus forte et plus prolongée lorsque la luminosité ambiante est faible. Ainsi, la nuit, nous sommes plus aveuglés par les phares d'une voiture en rase campagne qu'au centre d'une ville.

Notre **perception du relief et du modelé des surfaces** qui nous entourent dépend de la direction selon laquelle la lumière les éclaire et du type d'ombre qu'elles créent. La direction de la lumière et la profondeur des ombres sont déterminées par la distribution spatiale des sources lumineuses et l'orientation des objets par rapport au soleil. Les ombres sont très importantes pour déterminer la position d'un objet dans l'espace lorsqu'il n'y a pas d'autre référence. Il est frappant de constater à quel point les ombres portées des photos ci-dessous rendent perceptible les avancées des tours et la distance qui sépare la statue du mur qui la jouxte.



(Photo : S. Reiter)



(Photo : S. Reiter)

Pour certaines tâches visuelles, des effets d'ombres apportés par un éclairage spécifique peuvent être recherchés pour accentuer le relief ou la texture de certains éléments. Sous la lumière solaire dirigée, le relief et le modelé sont tous deux accentués. La lumière diffuse d'un ciel couvert induit en général une sensation de monotonie et atténue le relief des éléments qu'elle éclaire.



(Photo : S. Reiter)

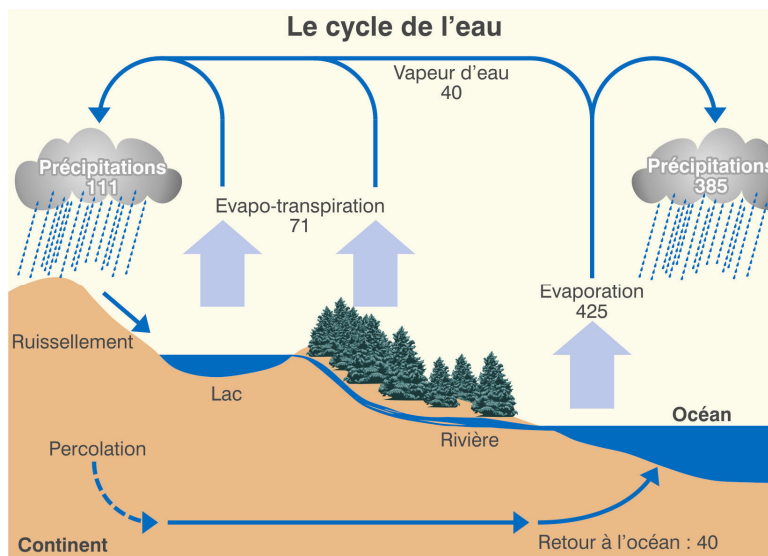


(Photo : S. Reiter)

2.3.6 Les critères quantitatifs du confort par rapport aux intempéries

Le régime des **précipitations** constitue un élément clé d'un climat et d'un lieu. Les précipitations recouvrent une réalité multiple : pluie, grêle, neige sont les manifestations d'un même processus fondamental, le cycle de l'eau. La terre compte quelque 1 460 millions de km³ d'eau, mais qui se trouvent à plus de 97 % dans les océans. Une fraction minimale (2,59 %) se situe sur les continents sous forme de neige, de glace ou d'eaux souterraines. Enfin, seule une infime proportion (0,014 %) est accessible aux organismes vivants.

La figure ci-dessous illustre le cycle hydrologique. Les chiffres présentés en milliers de km³ sont difficiles à estimer mais ils permettent de se faire une première idée du bilan hydrologique global.



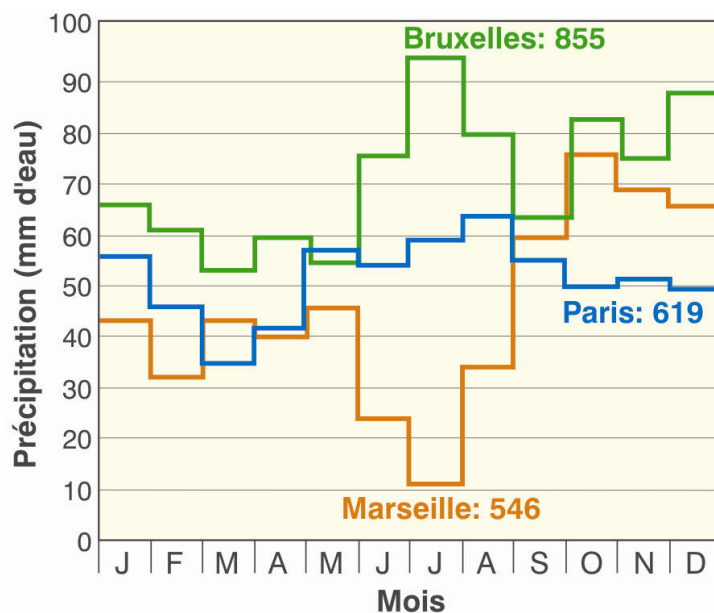
Les lacs, les ruisseaux, les rivières et les fleuves sont continuellement alimentés en eau douce par la vapeur d'eau atmosphérique, lorsqu'elle précipite sous forme de pluie ou de neige. Il tombe en moyenne 1 mètre d'eau par an sur toute la surface de la Terre. Au niveau des océans, sous les climats tropicaux, près de 425 000 km³ d'eau s'évaporent (soit environ 117 cm) et 385 000 km³ précipitent chaque année. Les continents reçoivent 111 000 km³ d'eau par an (± 74 cm), dont 40 000 proviennent des océans et 71 000 de l'évaporation des eaux continentales et de la transpiration des végétaux.

Pour fermer le cycle, on estime que 40 000 km³ d'eau retournent chaque année de la terre à la mer. Sur cette quantité, l'homme ponctionne environ 9 000 km³, ce qui devrait suffire à assurer largement la subsistance de 20 milliards d'êtres humains mais ces ressources en eau ne sont pas uniformément réparties. En Islande, les précipitations assurent près de 65 000 m³ d'eau par an et par habitant, alors que ce chiffre est quasiment nul pour les habitants du golfe Persique.

De nos jours, plus de 1,2 milliard d'hommes ne disposent pas du minimum élémentaire de 20 litres d'eau potable par jour. Dans les pays en développement, trois personnes sur cinq n'ont pas encore accès à l'eau potable. L'eau est donc une richesse à conserver et protéger. Pour le développement durable des villes, il est important de promouvoir des aménagements urbains qui préservent et valorisent l'eau.

Cependant, les intempéries sont souvent une cause d'inconfort pour les piétons. Dès qu'il pleut ou qu'il neige, la situation devient rapidement inconfortable. Il est donc judicieux d'évaluer l'intensité et la distribution des intempéries dans le climat considéré.

La figure ci-dessous permet de comparer les valeurs des précipitations mensuelles et annuelles à Bruxelles (855 mm/an), Paris (619 mm/an) et Marseille (546 mm/an). En plus des valeurs quantitatives, il est intéressant de comparer le calendrier des précipitations : été pluvieux à Bruxelles, été très sec à Marseille, averses réparties sur toute l'année à Paris.



Le tableau ci-dessous donne précisément la moyenne mensuelle des précipitations à Bruxelles.

Précipitations à Bruxelles												
Total /an [mm]	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
855	66	61	53	60	55	76	95	80	63	83	75	88

Le confort par rapport aux précipitations est un élément essentiel du confort des piétons. C'est malheureusement un paramètre qui est toujours négligé. Nous n'avons pu trouver aucune référence donnant des limites quantitatives par rapport à la quantité d'eau tombant par mois au-delà de laquelle des protections contre les intempéries dans les espaces publics deviennent indispensables pour un bon confort des piétons.

Nous proposons deux valeurs de manière intuitive mais il serait nécessaire de les tester sur des cas concrets. Il nous semble qu'au-delà de 50mm d'eau en moyenne par mois, la protection contre les intempéries devient un paramètre non négligeable du confort des piétons dans les espaces publics urbains et qu'au-delà de 100 mm par mois, cela devient un élément réellement critique.

Ainsi, on voit que ni Paris, ni Bruxelles, ni Marseille ne nécessitent des protections contre les intempéries dans tous leurs espaces publics, puisque la pluviosité y est toujours inférieure à 100 mm d'eau par mois. Par contre, le fait de pouvoir se protéger de la pluie est un élément non négligeable dans l'évaluation du confort pendant toute l'année à Bruxelles, pendant 6 mois par an à Paris et pendant 4 mois par an à Marseille. On peut en déduire que l'utilisation de protections contre les intempéries à Bruxelles est un élément qui favorise le confort des piétons tout au long de l'année. C'est donc, parmi ces trois villes, celle où il sera le plus utile de prévoir des zones piétonnes protégées de la pluie, telles que des galeries, des auvents, ...

Ainsi, en Belgique, les protections contre les intempéries dans les espaces publics extérieurs sont toujours bienvenues car elles favorisent leur utilisation lorsqu'il pleut. Les deux photos ci-dessous montrent bien que, par temps de pluie, les personnes se déplacent aisément avec un parapluie mais qu'elles ne s'arrêtent dans un espace public que si elles peuvent être à l'abri de la pluie.



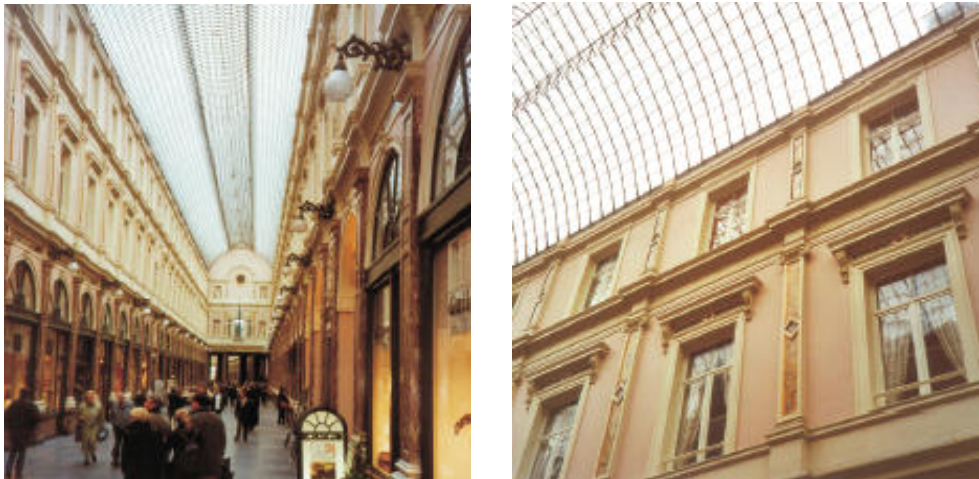
Protections contre les intempéries. (Photos : S. Reiter).

D'autre part, les aménagements qui permettent de se déplacer au sec quand il pleut sont très utiles toute l'année pour motiver les personnes à marcher plutôt qu'à prendre une voiture. Grâce à ses longues galeries ouvertes sur l'espace de la rue, la ville de Louvain-La-Neuve offre un très bel exemple d'un réseau d'espaces publics assurant le confort par rapport aux intempéries. Il est donc très agréable d'y cheminer quelque soient les conditions météorologiques.



Protections contre les intempéries à Louvain-la-Neuve. (Photos : S. Reiter)

A Bruxelles, l'architecte J.-P. Cluysenaer a contribué à donner à la typologie de la galerie couverte une dimension monumentale et une fonction de structuration urbaine. Les Galeries royales Saint-Hubert, édifiées à Bruxelles en 1847 et conservées pratiquement intactes, sont toujours un exemple remarquable de lieu public protégé des intempéries. Ces magnifiques galeries mêlent des fonctions publiques (commerces, cafés et lieux culturels) et des fonctions privées (appartements). Elles comportent trois espaces publics différenciés (la Galerie du Roi, la Galerie de la Reine et le Passage du Prince) qui s'inscrivent dans les rues du centre ville par trois portiques. Lieu de rencontres et de loisirs, les galeries contribuent depuis leur récente restauration à la revitalisation du centre de la capitale. Elles sont un des lieux les plus prisés des Bruxellois et des touristes.



Galeries Saint-Hubert à Bruxelles. (Photos : S. Reiter).

Notons que la protection par rapport aux intempéries devient un élément réellement critique de la conception des espaces publics dans les climats froids (chutes de neige,...) ou très pluvieux (moussons,...). Dans les climats à fortes précipitations, les galeries couvertes et autres protections contre les intempéries sont des éléments indispensables pour la conception d'espaces publics confortables et la valorisation de cheminements privilégiés.

Il est important de protéger les édifices et les lieux de détente de la neige. Dans les climats froids, une architecture spécifique est créée pour tenir compte de ces besoins de protection par rapport aux précipitations. Le principe de base est que la neige se dépose et s'accumule là où il y a une bonne protection au vent.



(Photos : S. Reiter).

2.4 Nouvelle méthode d'évaluation du confort à l'extérieur

Les espaces extérieurs présentent peu de contraintes. Les personnes qui s'y arrêtent y sont par leurs propres choix. Cependant, cette thèse montre clairement que le microclimat est un des facteurs qui influencent l'utilisation des espaces publics. Le confort climatique n'est pas suffisant pour rendre une place agréable mais il participe à l'évaluation ou à la dépréciation des caractéristiques physiques du site.

Ainsi, la perception du confort possible détermine le fait de sortir à l'extérieur et l'impression de confort ressentie motive à s'arrêter dans un espace plutôt que de le traverser. Cependant, lorsque quelqu'un a décidé de sortir et de s'asseoir dehors, il s'est préparé à s'accommoder aux conditions extérieures. C'est là que l'adaptation psychologique prend toute son importance. En fait, les êtres humains évitent l'inconfort mais ne recherchent pas spécialement un confort optimal.

La notion de confort est vécue comme une sensation globale de bien-être ou d'inconfort, ce qui engendre une difficulté à percevoir d'où vient la cause d'une insatisfaction. Le confort est aussi bien influencé par des éléments objectifs que subjectifs. Une approche uniquement quantitative est donc insuffisante pour décrire les conditions de confort à l'extérieur. Toute étude prenant en compte la qualité des espaces publics urbains se doit d'intégrer deux démarches: artistique et scientifique, qualitative et quantitative, dès l'esquisse d'un projet, ce qui est rarement réalisé.

Notre nouvelle approche du confort dans les espaces publics urbains consiste à réunir les approches physiologiques et psychologiques, quantitatives et qualitatives, afin de favoriser une utilisation optimale des éléments climatiques dans les espaces publics. Ce point de vue est une innovation. Cette stratégie de conception, basée sur le rassemblement des critères à la fois quantitatifs et qualitatifs, ne vise pas à limiter les solutions possibles mais bien à enrichir le processus de conception et les futures réalisations urbanistiques. Les concepteurs peuvent jouer sur tous ces facteurs pour améliorer concrètement la qualité des espaces publics urbains.

Il ne faut pas limiter le confort à une seule solution possible: la neutralité physiologique. Grâce à notre capacité à nous adapter à notre environnement, nous pouvons envisager une gamme de sensations physiologiques acceptables associée à la liberté de pouvoir nous adapter à notre environnement. Ainsi les aspects physiologiques et psychologiques du confort sont complémentaires et non pas contradictoires.

Une conception prudente et étudiée des ambiances urbaines peut fournir une protection contre les aspects négatifs et une exposition aux aspects positifs de l'environnement climatique et sonore en milieu urbain, pour la majorité des utilisateurs pendant la plus grande partie du temps. Ce doctorat permet d'affirmer que la conception d'un projet urbain de qualité du point de vue des ambiances urbaines doit intégrer la question du confort humain à travers une évaluation quantitative de l'équilibre thermique des piétons, de l'effet mécanique du vent, de la qualité de l'air, du niveau sonore, de la luminance des surfaces et de l'intensité des intempéries ainsi qu'une évaluation qualitative des critères qui influencent l'adaptabilité psychologique des piétons, afin de tirer les conclusions les plus judicieuses de cet ensemble de critères pour améliorer les possibilités de confort des piétons dans les espaces publics.

Les paramètres physiologiques du confort thermique sont la température et la vitesse de l'air, le rayonnement, l'humidité relative, l'habillement des citoyens et leurs activités. Le problème de tous les indices de confort thermique est de fixer des limites quantitatives trop strictes. Il est en effet justifié de donner des valeurs quantitatives de l'inconfort thermique à l'extérieur mais aucun système n'existe actuellement pour préciser ces valeurs de manière exacte. Notre point de vue est qu'une détermination trop complexe du confort thermique quantitatif à l'extérieur est inutile à cause de l'importance des processus d'adaptation psychologique qui modifient largement la sensation de confort perçue. Deux méthodes intéressantes doivent être signalées : celle d'Olgay parce qu'elle est très expressive de par sa présentation graphique et que son évaluation est très rapide et surtout celle de Brown et Gillespie, que nous avons adaptée pour offrir un calcul simplifié mais détaillé du bilan thermique d'une personne, qui fait intervenir les paramètres urbanistiques (facteur de vue du ciel, albedo des surfaces,...). Ces deux méthodes permettent de déterminer rapidement les paramètres à modifier pour améliorer une situation spécifique.

Pour l'inconfort lié à l'effet mécanique du vent, nous avons opéré un choix de critères de confort et d'insécurité parmi un très grand nombre de critères présentés dans la littérature. La règle la plus importante à retenir est la suivante : la vitesse moyenne de l'air doit être inférieure à 5m/s sur l'ensemble de l'espace public pendant la plus grande majorité du temps ($U \leq 5\text{m/s}$).

Pour une étude plus précise, notre choix se porte sur les deux critères scientifiques suivants :

- limite du confort : $P(U + \sigma_u > 6\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, avec U vitesse moyenne horaire à 1.5 m du sol et $U + \sigma_u$ est la vitesse de vent effective. P_{max} est une probabilité maximale de 5% pour un long séjour immobile, de 10% pour un court séjour immobile et de 15% pour flâner.
- limite de danger : $P(U + 3 \sigma_u > 20\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, où $P_{\text{max}} = 1 \text{ heure/an} = 0.01\%$. Le terme $U + 3 \sigma_u$ correspond à la vitesse de vent effective pour une turbulence maximale mesurée en une heure par moyennes de 3 secondes de mesures.

Il faut toutefois garder à l'esprit que si le confort des piétons lié à l'effet mécanique du vent nécessite que les vitesses de vent ne soient pas trop fortes ($U \leq 5 \text{ m/s}$), une bonne ventilation des rues pour assurer la qualité de l'air et leur confort respiratoire demande une vitesse de vent minimale de 2m/s au-dessus des toits.

Par ailleurs, la pollution atmosphérique ne devrait pas dépasser les seuils suivants afin de respecter le confort respiratoire des citoyens.

Polluant	Type de concentration	Valeur de la norme
SO ₂	Horaire	350 µg/m ³
	Journalière	125 µg/m ³
NO ₂	Horaire	200 µg/m ³
	Annuelle	40 µg/m ³
PM10	Journalière	50 µg/m ³
	Annuelle	20 µg/m ³
Pb	Annuelle	0.5 µg/m ³
O ₃	8h-max	120 µg/m ³
CO	8h	10 µg/m ³
Benzène	Annuelle	5 µg/m ³

Du point de vue quantitatif de la gêne sonore en ville, les niveaux sonores équivalents ($L_{Aeq,8h}$) doivent être strictement limités dans les espaces publics à une valeur de 65 dB(A) en journée et à une valeur de 60 dB(A) la nuit.

Il y a quatre conclusions importantes pour le confort visuel quantitatif des piétons :

- à l'exception de rues très étroites et profondes ou de certaines arcades, la lumière naturelle est toujours suffisante dans les espaces urbains du point de vue du confort visuel.
- il faut favoriser les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. En première approximation, ces zones correspondent aux parties de l'espace pour lesquelles le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de l'espace reste inférieur à 1/2 (c'est-à-dire $H/W < 0.5$).
- pour correspondre aux préférences des utilisateurs de ces espaces, le potentiel d'ensoleillement direct d'un espace public devrait couvrir entre 20% et 80% de sa surface totale quelle que soit l'heure ou la saison.
- Les problèmes majeurs rencontrés à l'extérieur du point de vue quantitatif du confort visuel sont de deux types :
 - en journée, les risques d'éblouissement qui sont le plus souvent générés par les réflexions spéculaires du rayonnement solaire direct sur des surfaces très réfléchissantes.
 - après le coucher du soleil, le mauvais éclairage artificiel des espaces publics.

Un élément important du confort physiologique constitue le fait de pouvoir être à l'abri des intempéries (pluie, neige,...). Dans les pays à fortes précipitations, toutes les protections contre les intempéries sont à valoriser : auvents, galeries,...

Différents critères psychologiques du confort humain à l'extérieur ont pu être mis à jour dans cette étude. Nous devons être conscients des implications significatives de ces éléments psychologiques sur le confort. Les concepteurs de l'espace urbain devraient tenir compte de ces paramètres pour améliorer la qualité de nos villes.

Nous avons relevé dix paramètres qui influencent de manière significative l'évaluation qualitative du confort à l'extérieur. Il s'agit de:

- la globalité de la sensation de confort,
- l'identification d'une ambiance,
- la relation au contexte,
- la continuité des conditions environnementales,
- la diversité des ambiances (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
- la perception du contrôle possible,
- la capacité de s'adapter,
- la naturalité du lieu (qui est aussi marquée par le besoin de stimulations environnementales en milieu urbain),
- la variabilité des conditions environnementales,
- le caractère signifiant du lieu.

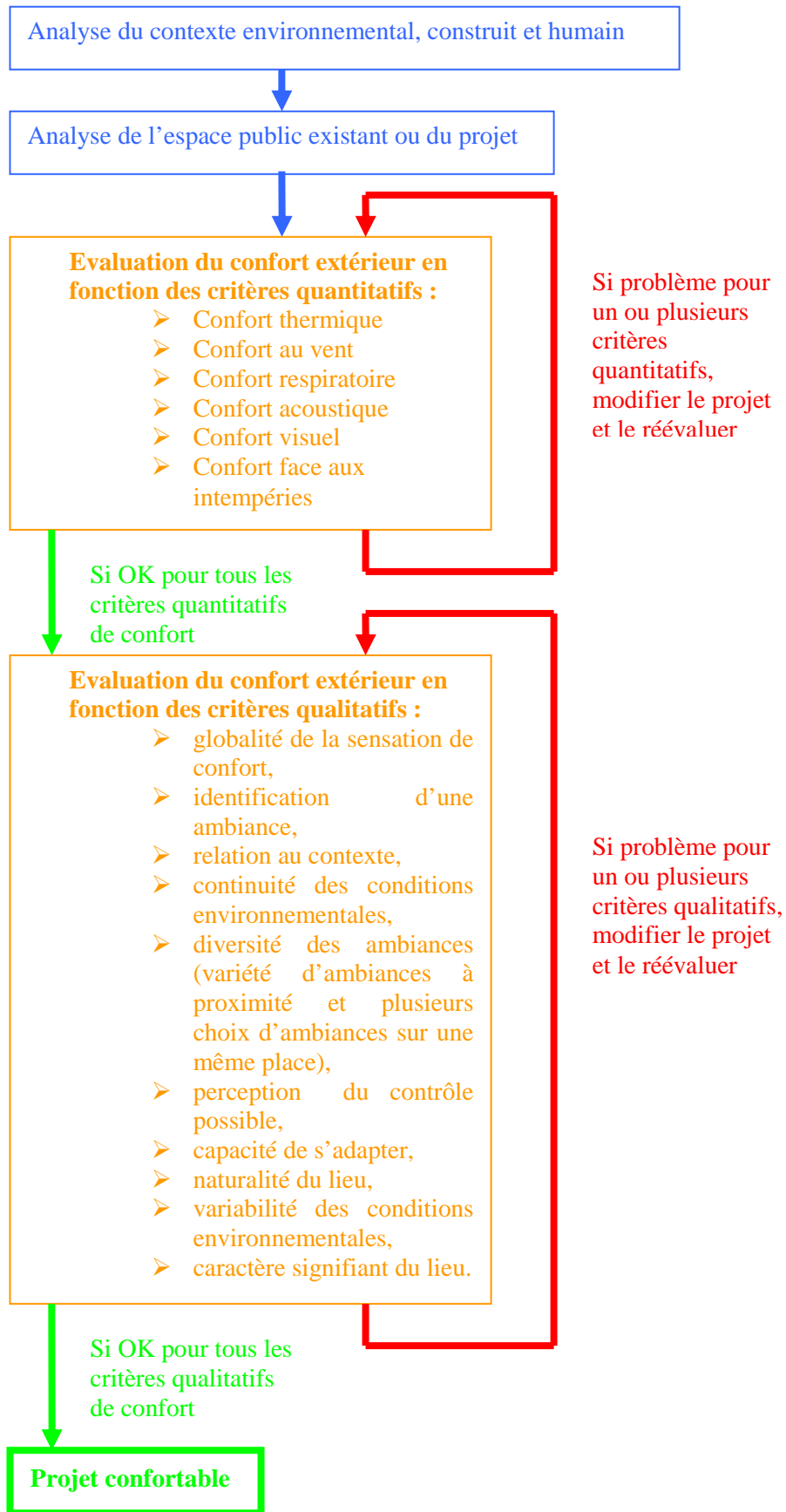
Notre étude a permis de constater que les critères physiologiques du confort des piétons doivent être définis séparément en fonction des différents types de confort: confort thermique, confort mécanique lié au vent, confort respiratoire, confort acoustique, confort visuel et confort par rapport aux intempéries. En revanche, les aspects qualitatifs du confort humain sont identiques pour ces différents types de confort physique.

Nous conseillons donc, dans un premier temps, d'évaluer un projet quantitativement suivant les moments les plus importants de l'année et de la journée pour pouvoir établir le pourcentage de temps pendant lequel l'espace conçu est confortable. A partir de ces données, il est possible d'évaluer les critères qualitatifs du confort, tels que la diversité des ambiances, la naturalité du lieu,... Ces critères devraient être évalués séparément et dans leur globalité pour voir quels sont les éléments environnementaux qu'il est nécessaire de modifier pour assurer, le plus souvent possible, le confort global (quantitatif et qualitatif) des personnes, en fonction des caractéristiques du contexte environnemental, construit et humain.

Malgré la complexité des interrelations ci-dessus, il est possible de considérer **quelques pistes de conception** qui vont influencer le confort des piétons en site urbain. Ainsi, il est déjà possible de modifier les conditions de confort d'une place par plusieurs moyens:

- en modifiant le microclimat d'un lieu par l'adaptation d'un de ses paramètres physiques, en général le rayonnement solaire ou le vent.
- en contrôlant le niveau sonore d'un espace.
- en valorisant les spécificités d'un lieu.
- en stimulant des activités adaptées au lieu.
- en créant des lieux de transition entre zones différentes (intérieur/extérieur, etc.) pour atténuer les contrastes par rapport à l'expérience passée récente et améliorer la continuité des conditions climatiques et sonores.
- en créant une ambiance différente de celle des places situées à proximité.
- en augmentant le contrôle perçu (par exemple par des dispositifs mobiles).
- en proposant plusieurs possibilités d'ambiances dans un même lieu: de l'ombre et du soleil, du vent et un abri, de l'animation et du calme, ...
- en augmentant la naturalité du lieu par de la végétation ou la possibilité d'une stimulation environnementale.
- en jouant sur la qualité signifiante des éléments environnementaux.

Le graphe ci-dessous synthétise la nouvelle méthode d'évaluation du confort extérieur qui a été développée dans le cadre de ce doctorat :



3. Etude du microclimat

« *C'est d'âme qu'il faut changer, non de climat* ». Sénèque.

Cette troisième partie aborde l'étude du microclimat. Après un court développement sur les différents types de climats et l'importance d'évaluer les paramètres climatiques locaux, cette section met en évidence les caractéristiques d'un site qui influencent son microclimat. Elle analyse ensuite les spécificités du microclimat urbain : la pollution de l'air en ville, l'effet d'îlot de chaleur urbain, la modification du rayonnement solaire en ville, la modification des mouvements d'air en milieu urbain et enfin la modification de l'humidité et des précipitations en ville. Elle décrit les méthodes d'évaluation des paramètres microclimatiques en milieu urbain.

3.1 Paramètres microclimatiques

Le climat a toujours été considéré comme un des éléments majeurs de la dynamique et de l'ambiance d'une ville. Dans son livre « *Principles of Human Geography* », Ellsworth Huntington nous explique que le climat est lié à l'héritage racial et au développement culturel de telle façon que c'est un des trois facteurs principaux pour déterminer les conditions d'une civilisation (Huntington 1951). Le problème de contrôler l'environnement et de créer un microclimat confortable pour les activités humaines est aussi vieux que l'homme lui-même. La conception d'un microclimat de qualité est un des éléments clés de tout projet d'aménagement de notre cadre bâti. Vitruve le disait déjà dans *De Architectura*. L'urbanisme et l'architecture vernaculaire en témoignent depuis longtemps (Escourrou 1991).

Cependant, bien que l'adaptation des villes au climat soit ancienne, les quartiers modernes ont rarement été conçus en tenant compte du microclimat. Souvent, les zones urbaines contemporaines créent des espaces publics très inconfortables pour les piétons et énergétivores du point de vue du transport (utilisation de la voiture à outrance,...) et des consommations d'énergie du bâti (maisons quatre façades,...).

De plus, la complexité du comportement climatique conduit de nombreux architectes contemporains à négliger les qualités intrinsèques du climat (lumière naturelle, vent, ...) au profit de technologies plus adaptables mais peu écologiques (éclairage artificiel, climatisation, chauffage,...), générant des problèmes globaux pour notre planète (pollution,...) et des problèmes locaux pour le bien-être et la santé des habitants. Ces espaces modernes inadaptés aux cycles naturels génèrent des problèmes microclimatiques importants, souvent visibles dans nos villes; citons, par exemple, les rafales de vent qui atteignent les piétons aux environs de nombreux immeubles-tours.

Tout espace construit, intérieur ou extérieur, concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec le milieu auquel il appartient. Dans le cadre du développement durable, il est essentiel de concevoir des lieux en concordance avec leur environnement, ce qui inscrit le microclimat parmi les dimensions fondamentales de l'architecture.

Nous désirons valoriser la conception de villes qui intègrent un rapport au climat, c'est-à-dire au soleil, à la chaleur et au froid, à la lumière et à l'ombre, au vent et à la pluie. Ceci implique un travail de conception qui requiert la prise en compte des limitations et des opportunités générées par le jeu des paramètres naturels (course du soleil, vitesse du vent,...). Une bonne conception adaptée au climat local alliée au contrôle des technologies nécessaires en accord avec ces données naturelles, présente l'avantage de réaliser de substantielles économies d'énergie, tout en améliorant le confort des citoyens. Cette conception climatique se traduit également par une diminution des quantités de déchets produits par le bâtiment au cours de son fonctionnement ou lors de sa démolition.

L'organisation urbaine locale et son microclimat ont une influence sur la qualité de l'air, de l'eau et les ressources du sol. La prise en compte du microclimat urbain est donc un des facteurs importants pour favoriser le bien-être et la santé des citoyens. Or toute ville devrait placer les objectifs de santé et de qualité de vie au cœur même de son processus décisionnel et de son développement.

De la même manière que les performances énergétiques d'un bâtiment dépendent du climat, le microclimat urbain influence fortement les consommations énergétiques d'une ville. L'interaction du climat et de la ville permet de limiter directement et indirectement de nombreuses consommations d'énergie. Les données microclimatiques ont une influence majeure sur la consommation du bâti en ville. Or, l'utilisation d'énergie dans les bâtiments compte pour 41% de la totalité de l'énergie consommée par l'Union Européenne et une proportion équivalente de la pollution générée (Steemers 2003).

L'environnement physique qui est façonné par les décisions d'urbanisme peut soit faciliter soit être un frein à un mode de vie sain. Le penchant des citoyens à pratiquer la marche, la bicyclette ou des loisirs en plein air est affecté par la qualité des pistes cyclables et des allées piétonnes de même que par la disponibilité des espaces publics de proximité. Ainsi, le contrôle des sources d'inconfort à l'extérieur favorise la marche, le vélo et l'utilisation des moyens de transport en commun. Ceci est un enjeu important vu que le transport urbain est le second facteur de consommation énergétique des villes et qu'il crée en outre des gros problèmes de pollution de l'air, de bruit et d'encombrement (Steemers 2003). Une politique de valorisation de modes de transport plus écologiques que la voiture passe donc par la requalification de l'espace public pour le piéton et le cycliste, ce qui implique d'étudier le microclimat urbain.

La relation que nous entretenons par rapport à notre climat est aujourd'hui fortement conditionnée par une attitude dominante des êtres humains face à la nature. Cette volonté de contrôler le climat est un comportement propre à la modernité, sous-tendu par l'explosion des technologies. La notion de développement durable nous motive à sortir de ce schéma où l'homme s'oppose à la nature. Il est temps que l'humanité s'engage dans une nouvelle relation de respect par rapport à la Terre et aux éléments naturels.

La conception microclimatique de nos urbanisations est un des moyens par lesquels une société peut inscrire sa relation à la nature, à la Terre et à l'univers. S'intéresser au climat, c'est remettre en valeur les éléments naturels : la lumière, l'air, l'eau, le sol,... c'est se rappeler que ces ressources sont un patrimoine collectif, qu'il est indispensable de gérer et de conserver en conscience. Rappelons que les conséquences sociales d'un manque de relation à la nature sont bien connues (dépressions, stress, violence), même si les mécanismes en jeu sont

complexes et impliquent aussi d'autres paramètres corrélés (surdensité, pollutions diverses,...). Il est donc urgent de réapprendre à concevoir nos villes avec le climat.

Ainsi, une conception urbaine qui participe à la création de microclimats de qualité est un atout majeur pour favoriser le développement durable de nos villes.

3.1.1 Les différents types de climats

Les principaux paramètres climatiques sont la température, le vent, le rayonnement solaire, l'humidité et les précipitations. Le climat d'un lieu peut être défini à trois échelles :

- le **macroclimat** est représenté par les caractéristiques climatiques principales d'un pays ou d'une surface de grande ampleur.
- le **mésoclimat** représente les paramètres climatiques régionaux influencés par les conditions géographiques locales telles que la topographie, la présence de masses importantes d'eau (mer, lac de grande taille,...), de végétation (forêts,...) ou de bâtiments (zones urbaines,...).
- le **microclimat** définit les conditions climatiques locales d'un site particulier. Il se réfère à des espaces de petites dimensions tels qu'un terrain, une rue ou une place. Il est influencé par le volume des constructions voisines mais aussi par la nature, l'orientation et l'inclinaison des surfaces, la présence d'arbres, etc. Chaque site est donc caractérisé par son microclimat.

A l'échelle macroclimatique, on peut déterminer quatre grands types de climats, classés selon la température et l'humidité : le climat tropical, le climat chaud et sec, le climat tempéré et le climat froid.

Les climats tropicaux sont caractérisés par une faible fluctuation saisonnière des données climatiques. La température de l'air varie le plus souvent entre 27 et 32 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit. L'humidité relative tourne autour de 75 % toute l'année. Le rayonnement solaire est important, même s'il est partiellement atténué par la couverture nuageuse; le vent est faible et les précipitations sont importantes.

Les climats secs correspondent aux zones géographiques des steppes ou aux régions désertiques; ils sont caractérisés par une saison très chaude et une saison moins chaude. Pendant la saison très chaude, la température de l'air varie entre 43 et 49 °C le jour et entre 24 et 30 °C la nuit. Pendant la saison moins chaude, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 10 et 18 °C la nuit. Le différentiel de température entre le jour et la nuit est important; l'humidité relative est faible (10 à 55 %) et le rayonnement solaire est intense; les vents sont souvent chauds et localisés, porteurs de sable et de poussières; les précipitations sont très faibles (50 à 155 mm/an).

Les climats froids correspondent aux zones géographiques dont l'altitude est élevée ainsi qu'aux zones de toundra et au climat polaire. Ce climat connaît un été très bref et humide et un hiver long, très froid, sec ou enneigé.

Les climats tempérés présentent une saison chaude et une saison froide. Le climat y est relativement doux toute l'année. Les paramètres climatiques y atteignent rarement des valeurs extrêmes.

Au niveau mésoclimatique, cette classification en quatre grands types de climats peut être affinée par l'identification de cycles saisonniers tels que la mousson ou de caractéristiques géographiques comme la proximité des océans, l'altitude, la présence de forêts, etc.

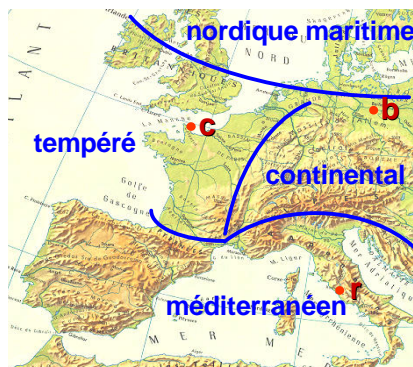
Les climats de mousson (appartenant aux climats tropicaux) sont par exemple caractérisés par une longue saison chaude et sèche et une courte saison chaude et humide. La température de l'air varie entre 32 et 43 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit en période sèche. En saison humide, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 24 et 27 °C la nuit. Le différentiel de température jour/nuit est alors très réduit. L'humidité relative moyenne est faible pendant la saison sèche (20 à 55 %), mais augmente considérablement en saison humide (55 à 95 %). Le rayonnement solaire est intense. Les vents sont forts et continus essentiellement pendant la mousson. Les précipitations peuvent atteindre 200 à 250 mm pour les mois les plus pluvieux.

Un autre exemple serait celui d'un climat chaud et sec situé en bordure d'océan. Les paramètres climatiques subissent dans ce cas l'influence de l'évaporation de masses d'eau importantes. L'humidité remonte entre 50 et 90 %, ce qui réduit le différentiel de température entre le jour et la nuit.

L'Europe est bordée par des régions dont les caractéristiques géographiques sont très contrastées : l'océan Atlantique à l'ouest, la mer Arctique au nord, la masse continentale à l'est, la Méditerranée et les déserts nord-africains au sud. Ainsi, l'Europe, dont le climat macroclimatique est globalement un climat tempéré, offre des caractéristiques géographiques diverses qui induisent quatre grandes zones mésoclimatiques : le climat nordique maritime, le climat tempéré, le climat continental et le climat méditerranéen.

- Le climat nordique maritime est caractérisé par de longs hivers où les jours sont courts et le rayonnement solaire limité. Les étés y sont doux.
- La zone tempérée est caractérisée par des hivers et des étés doux ainsi qu'un rayonnement solaire limité. La Belgique a un climat tempéré : doux, humide et couvert. La composante diffuse du ciel est souvent très importante.
- La zone continentale est caractérisée par des hivers plus rigoureux mais bénéficiant d'une insolation plus importante. Les étés y sont chauds.
- La zone méditerranéenne correspond à la façade européenne du bassin méditerranéen. Les hivers y sont doux, les jours longs et l'insolation intense. Les étés y sont chauds.

Le schéma ci-dessous montre la répartition géographique des principales zones mésoclimatiques européennes. .



(Liébard & De Herde 2005).

Les paramètres microclimatiques correspondent aux conditions météorologiques réellement expérimentées sur un lieu particulier à l'échelle du bâtiment, de la place, de la rue, du terrain à bâtir,... Ces caractéristiques du microclimat local sont donc très dépendantes du contexte naturel et construit du site analysé.

3.1.2 Les données climatiques disponibles

Les données climatiques disponibles pour les concepteurs de projets architecturaux et urbains sont généralement relevées dans les stations météorologiques sur une période de 30 ans. Les températures moyennes horaires y sont mesurées sous abri à 1.5 m du sol ; elles sont donc indépendantes de l'influence du rayonnement solaire direct mais elles dépendent tout de même du type de ciel. Les relevés de vent effectués dans les stations météorologiques sont en revanche effectués à une hauteur standard de 10 m au-dessus d'un terrain plat et découvert.

Les données météorologiques représentent des valeurs moyennes pour la région locale dans laquelle cette station de mesure se situe. Ces données sont représentatives du mésoclimat local. Les différents paramètres mésoclimatiques moyens de la Belgique ont été précisés dans la seconde partie de ce doctorat et plus particulièrement dans la section traitant des critères quantitatifs du confort des personnes dans les espaces publics. Les paragraphes qui suivent sont centrés sur les paramètres microclimatiques, ce qui nécessite de tenir compte non seulement des données météorologiques régionales mais aussi des éléments spécifiques du site considéré.

Les programmes de calculs énergétiques des bâtiments se basent en général sur les données climatiques mesurées aux stations météorologiques. Cependant, le microclimat réel sur un site peut être significativement différent de celui mesuré à la station météorologique, ce qui implique que les simulations réalisées donneront des résultats substantiellement erronés, surtout si le projet est situé en milieu urbain où le microclimat est en général assez différent du terrain dégagé de la station météorologique.

De même, pour évaluer les probabilités du confort des personnes dans un espace public, il est indispensable de posséder les valeurs microclimatiques du site étudié et non les données météorologiques.

Si, à l'heure actuelle, les seules données climatiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site dégagé, comment tenir compte de l'effet de l'urbanisation dans notre conception architecturale et urbaine? Comment prédire et simuler ces effets? Il est indispensable de pouvoir évaluer le microclimat local d'un lieu, spécialement lorsqu'il s'agit d'un milieu urbain.

Peu d'études pour l'instant abordent la recherche de données microclimatiques réalistes pour la conception architecturale et urbaine. Dans cette thèse de doctorat, nous désirons offrir une méthode et des outils pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à évaluer les paramètres microclimatiques qui interagissent avec leurs projets, à partir de la description du site et du projet ainsi que des données de la station météorologique la plus proche. Les outils d'analyse du microclimat d'un site sont de trois types :

- les mesures sur site,
- les simulations performantes,
- les outils simplifiés et les règles stratégiques d'aide à la conception.

Les outils simplifiés et les règles stratégiques d'aide à la conception sont les seules méthodes qui permettent de guider la conception architecturale avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné et ils sont très pratiques lors de la première phase de conception. D'autre part, les contraintes financières et temporelles imposées à la majorité des projets ne permettent souvent pas d'utiliser des modes d'évaluation du microclimat plus sophistiqués, demandant un délai et un financement spécifique. Notre choix se porte donc dans cette thèse doctorale vers l'analyse et l'élaboration de méthodes simplifiées.

Une partie importante de cette thèse de doctorat consiste à élaborer des règles de conception à la fois quantitatives et qualitatives pour les différents paramètres microclimatiques. Ces outils et ces règles de conception ont pour objectif essentiel d'expliquer aux architectes l'influence des différents éléments en jeu sur le microclimat de leur projet.

L'hypothèse de travail choisie est que les observations moyennes horaires de la station météorologique peuvent être transformées pour approcher de manière approximative le microclimat du site, grâce à des relations générales liant les caractéristiques physiques du site et du projet au microclimat généré. Ces transformations doivent être faites successivement pour chaque élément climatique (rayonnement solaire, vent, température,...) pour passer de l'échelle climatique régionale à l'échelle microclimatique du site. Ces transformations sont définies de manière approximative par des abaques et des calculs réalisables manuellement (du genre de celui proposé pour le confort thermique quantitatif).

Nous pensons que, dans le contexte actuel, il est d'abord essentiel de sensibiliser les concepteurs à l'importance de l'étude du microclimat et de les familiariser avec les concepts de base d'une stratégie microclimatique. Cependant, dans des recherches futures, il serait judicieux de créer un logiciel permettant de réaliser ce genre de calculs automatiquement, ce qui permettrait aux architectes et aux urbanistes désireux d'utiliser un tel outil d'obtenir rapidement l'évaluation des paramètres microclimatiques une fois qu'un premier projet a déjà été élaboré.

Sur les cinq éléments microclimatiques importants qui affectent le bilan énergétique des bâtiments et des personnes, le rayonnement solaire et le vent sont les deux éléments qui sont les plus importants dans un climat tempéré, ce qui est le cas de la Belgique. Ce sont par ailleurs les paramètres climatiques les plus variables en fonction de la morphologie urbaine locale. En effet, la température et l'humidité peuvent être modifiées très localement par des aménagements appropriés mais restent le plus souvent constantes pour l'ensemble d'un quartier morphologique. Enfin, s'il est possible de se protéger localement des précipitations, il n'est pas envisageable de concevoir une morphologie urbaine dans le but d'en modifier les statistiques d'occurrence. Ainsi, le rayonnement solaire et le vent nous semblent les deux paramètres les plus importants à étudier en détail du point de vue microclimatique.

Vu que différents outils d'aide à la conception existent du point de vue du rayonnement solaire, nous nous contenterons de les résumer dans cette thèse. Par contre, l'étude de l'écoulement du vent autour des bâtiments semble être un sujet très peu étudié, malgré son importance significative sur le confort des personnes et les consommations énergétiques des bâtiments. C'est donc pour cette raison qu'une partie importante de ce doctorat sera dédiée à l'analyse des outils de simulation du vent et à l'élaboration d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des constructions.

3.1.3 Les éléments qui déterminent le microclimat d'un site

Chaque lieu spécifique développe sa propre identité microclimatique vis-à-vis de sa région et de son climat général. La topographie, la nature du sol, la végétation et l'urbanisme influencent entre autres les données microclimatiques d'un lieu. Dès lors, la conception des espaces publics nécessite de prendre en compte non seulement les données climatiques mesurées à la station météorologique la plus proche mais aussi les composantes de l'environnement construit et naturel du site étudié.

Lors de la conception d'un bâtiment ou d'un espace public, il est donc important d'évaluer l'impact de l'environnement existant sur le microclimat du site, afin de profiter au mieux des possibilités offertes par le terrain et de se protéger de ses inconvénients, ainsi qu'évaluer l'impact du nouveau projet sur ce microclimat, pour optimiser les avantages que le projet peut apporter au site et limiter les nuisances qu'il pourrait induire.

Au niveau local, les paramètres climatiques dépendent de:

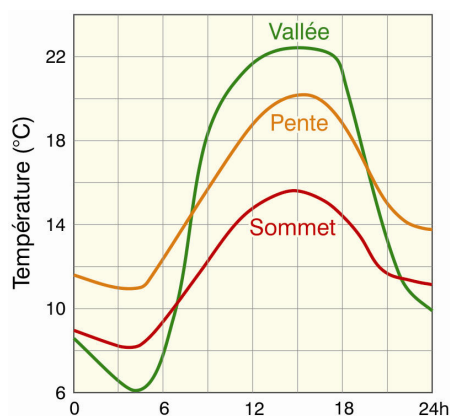
- **la topographie du site et de ses environs,**
- **la nature du sol sur le site et ses environs (mer, forêt, ville,...),**
- **l'aménagement du site et de ses environs (bâtiments, arbres, ...).**

Les points suivants vont analyser comment chacune des variables microclimatiques (la température, le rayonnement solaire, le vent, l'humidité et les précipitations) est influencée par ces trois éléments.

La température locale

Le relief influence la température par les variations qu'il induit de jour sur l'irradiation solaire des pentes en fonction de leurs orientations et de leurs inclinaisons ainsi que les variations qu'il crée au niveau du régime des vents.

La figure ci-dessous propose d'examiner l'évolution typique des températures extérieures sur 24 heures en trois points d'un relief montagneux, le premier étant situé dans la vallée, le second au milieu de la pente et le troisième au sommet.



(Architecture et Climat 1998).

On constate que de jour les vallées sont en général plus chaudes que les sommets. Par contre, de nuit, le soleil n'entrant plus en ligne de compte, l'air se refroidit. Or, l'air froid est plus lourd que l'air chaud. Pendant la nuit, l'air froid coule donc vers

la vallée, tout en remplissant les dépressions locales, et s'accumule au fond de la vallée. De nuit, ce sont donc les pentes qui sont les zones où la température est la plus élevée et les vallées où la température est la plus froide.

Le rayonnement solaire reçu par un espace public ou un bâtiment dépend de l'orientation et de l'inclinaison du terrain sur lequel il se trouve. Une superficie perpendiculaire aux rayons du soleil reçoit le maximum d'énergie solaire par unité de surface. C'est pourquoi les pentes orientées au sud (dans l'hémisphère nord) reçoivent plus de soleil que les autres orientations. Les pentes plus raides reçoivent généralement plus de soleil que les terrains plats sauf pour une pente orientée au nord, qui est la configuration qui reçoit le moins de rayonnement solaire.

Le sommet d'une colline est généralement l'endroit le plus venteux, ce qui refroidit la température de l'air à cet endroit. Les faces exposées au vent sont plus froides que les faces protégées du vent.

L'altitude a également une influence sur la température moyenne de l'air. La diminution de température est de l'ordre de 0,7°C par élévation de 100 m. Ceci explique qu'un même bâtiment situé dans la région de Spa aura une consommation de chauffage 60% plus élevée que s'il était situé à Bruxelles.

La température de l'air en un lieu dépend également de la nature des surfaces environnantes. En effet, la nature du sol est déterminante dans le phénomène de transfert de chaleur entre les surfaces du site et l'air, provoqué par la réémission sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde et par convection.

Les sols couverts de végétation (herbes, taillis,...) rafraîchissent l'air par évapotranspiration de l'eau. Les sols aménagés par l'homme et couverts par des matériaux à forte inertie (béton, pavés, briques,...) stockent la chaleur durant les journées ensoleillées et la rayonnent en début de soirée. Ils ont pour effet de retarder la chute de température nocturne. Les étendues d'eau stockent de grandes quantités de chaleur avec aisance. A l'inverse des sols urbanisés qui s'échauffent et restituent la chaleur rapidement, l'eau emmagasine et rend la chaleur lentement. L'eau agit comme tampon thermique en réémettant la chaleur par rayonnement et convection pendant la saison froide. Elle réduit donc les variations climatiques saisonnières. C'est pourquoi il fait plus chaud en bord de mer que dans une zone continentale en hiver, à l'inverse de l'été où il fait plus chaud à l'intérieur des terres qu'à la côte.

La température d'un lieu est aussi influencée par l'aménagement du sol à cet endroit : bâtiments, arbres,...

En ville, les apports gratuits provenant des activités humaines (véhicules, industries, chauffage, etc...) s'ajoutent à la présence de matériaux à forte inertie pour réchauffer l'atmosphère. La température de l'air en ville est en moyenne sur l'année de 0.5 à 3°C plus élevée qu'en site dégagé. C'est ce qu'on appelle l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Dans les régions fortement boisées, le feuillage des arbres intercepte de 60 à 90% de la radiation solaire, empêchant l'augmentation de température du sol en journée. Ainsi, l'air s'échauffe dans une moindre mesure qu'ailleurs. Par ailleurs, les arbres empêchent l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte céleste pendant la nuit, limitant ainsi la chute de température nocturne. On constate ainsi que les écarts de température sont moins importants dans les régions boisées que dans les

zones dégagées. Cette influence des arbres est permanente ou saisonnière suivant qu'il s'agit d'arbres à feuillage persistantes ou caduques.

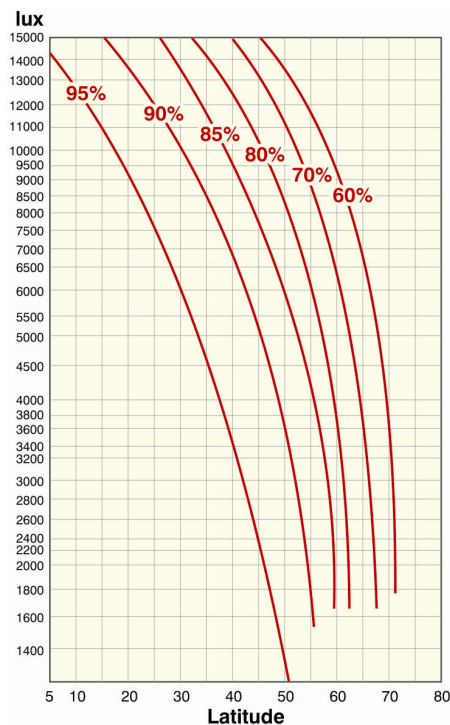


(CEE 1992)

Les sites dégagés sont fortement balayés par les vents et largement ouverts vers la voûte céleste. Il y fait donc en moyenne plus froid que dans les zones urbanisées ou plantées d'arbres. Les variations de température y sont plus importantes entre le jour et la nuit.

Le rayonnement solaire local

La lumière disponible en un lieu dépend d'abord de la latitude du site considéré. L'ensemble des courbes de la figure ci-dessous peut être utilisée pour déterminer la disponibilité de lumière naturelle d'un site en fonction de sa latitude. Pour une certaine latitude choisie sur l'axe horizontal, des pourcentages de temps (entre 9h et 17h) sont donnés qui représentent la période pendant laquelle une valeur d'éclairement extérieur horizontal (sur l'axe vertical) est dépassée (CEE 1996-b). Cette disponibilité lumineuse est basée sur un ciel couvert moyen adapté à chaque climat. Donc, les climats où le ciel est peu couvert sont défavorisés par ce type d'interprétation...



Disponibilité lumineuse à l'extérieur en fonction de la latitude (CEE 1992b, réalisé d'après C.I.E, n°16, 1970).

La ville de Bruxelles est située à une latitude de 50.8° (nord). Les valeurs d'éclairement par ciel serein et par ciel couvert pour la Belgique ont déjà été données dans la description des critères quantitatifs du confort visuel.

Outre l'influence de la latitude d'un site, le rayonnement solaire disponible dépend de l'environnement direct du site considéré, c'est-à-dire le relief du terrain, les obstacles (bâtiments et arbres), le coefficient de réflexion du sol, Ces éléments ne doivent pas être négligés : la présence d'un gratte-ciel, d'un lac ou d'un arbre peut radicalement transformer la lumière d'un espace.

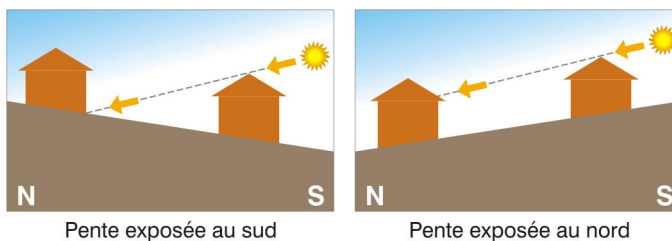
Le relief influence les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et le régime des vents. La topographie peut constituer un ombrage important à l'ensoleillement en hiver, où les vallées orientées est-ouest risquent d'être en permanence à l'ombre. En Belgique, on préfère situer les zones bâties suffisamment haut à flanc de colline pour bénéficier du soleil même en hiver.

L'éclairement d'un site en pente dépend de la géométrie solaire ainsi que de l'orientation et de l'inclinaison du terrain. Les pentes orientées vers l'est offrent de beaux levers de soleil et sa disparition rapide dans la soirée; les versants ouest montrent de superbes couchers mais un soleil qui se lève tard; le creux de la vallée reçoit une période d'ensoleillement direct plus courte que le sommet. Les pentes sud jouissent d'une meilleure insolation que les terrains plats. Il faut prendre en compte les caractéristiques naturelles du site et tirer profit du profil du terrain.



(Photo : S. Reiter).

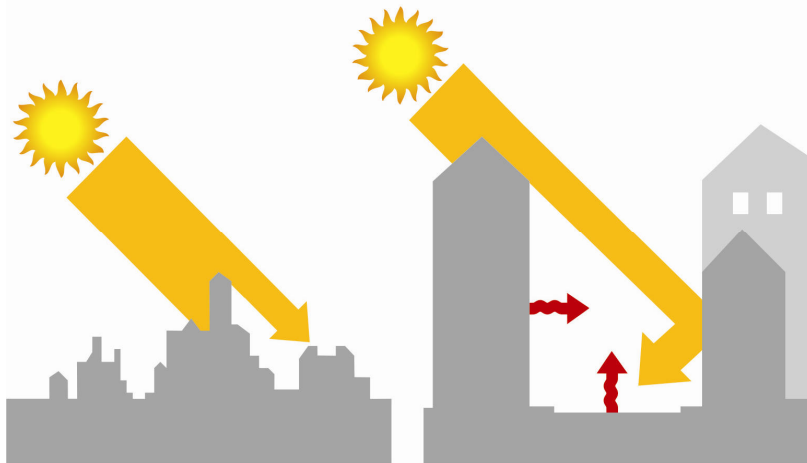
Les bâtiments qui sont situés sur une pente orientée vers le sud peuvent être rapprochés les uns des autres par rapport à un terrain plat pour obtenir le même accès au soleil dans l'espace public. Inversement, une pente orientée au nord induit une perte d'ensoleillement surtout pour les latitudes élevées. Ainsi, les pentes fortes orientées vers le nord doivent à tout prix être évitées si on désire profiter de la lumière solaire dans les espaces publics. Les graphes ci-dessous permettent de comparer l'ensoleillement reçu par des bâtiments identiques pour une même hauteur solaire sur une pente orientée au sud et une pente orientée au nord.



Pente exposée au sud

Pente exposée au nord

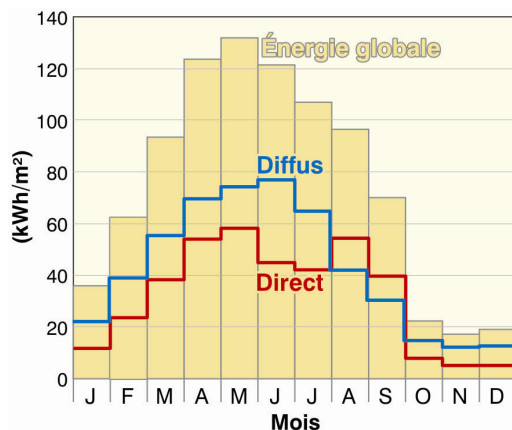
Les constructions constituent des écrans fixes pour leur voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on recherche une protection contre le soleil : c'est le cas des villes méditerranéennes traditionnelles, où l'étroitesse des ruelles et la hauteur des bâtiments réduisent considérablement le rayonnement direct et fournissent un ombrage bienvenu. Par contre, ce rôle peut être négatif si les bâtiments voisins masquent le soleil alors qu'on souhaite bénéficier d'apports solaires. Dans les pays de latitude moyenne, durant les mois d'hiver, 90% environ des apports solaires interviennent entre 9h et 15h solaire. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil pendant ces heures, gêneront grandement l'utilisation des gains solaires.



(CEE 1992)

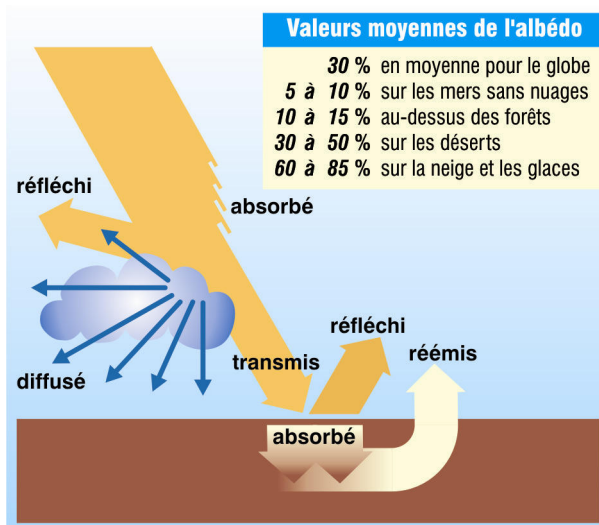
Une nébulosité artificielle telle que celle créée par la pollution urbaine peut également réduire le rayonnement solaire sur le site.

Le rayonnement solaire peut être reçu soit par un rayon direct du soleil, soit par un rayon diffusé par le ciel, soit par un rayon réfléchi par une surface terrestre. Le diagramme ci-dessous montre l'éclairage énergétique diffus, direct et global sur une surface horizontale à Bruxelles. Sur l'année, la part d'énergie solaire diffuse vaut environ 55% de l'énergie globale et elle est donc plus importante que la part du rayonnement direct. On constate qu'en Belgique, seuls les mois d'août et de septembre connaissent un ensoleillement direct plus important que l'ensoleillement diffus. La conception des espaces publics en Belgique nécessite dès lors de tenir compte des situations de ciel couvert et pas seulement de l'ensoleillement direct.



Energie moyenne reçue à Bruxelles sur une surface horizontale (Liébard & De Herde 2005).

L'albédo des surfaces détermine la quantité de rayonnement solaire reçue par les surfaces qui sera réfléchi vers l'espace. Le graphe ci-dessous donne les valeurs moyennes de l'albédo en fonction de la nature du sol.



(Architecture et Climat 1998).

Le rayonnement solaire reçu dans un espace public dépend du facteur de réflexion de toutes les surfaces qui le bordent : sol, façades,... L'emploi de matériaux réfléchissants peut augmenter l'exposition effective d'une surface.



(Gratia & De Herde 2002)

Le vent local

Les vitesses de vent au niveau microclimatique dépendent de différents facteurs :

- **la localisation**, en fonction de la proximité de la station météorologique de référence.
- **la topographie**, c'est-à-dire le type de paysage essentiellement défini par le relief. Les paramètres essentiels sont la hauteur et le contour de l'horizon. Lorsqu'un bâtiment est situé au sommet ou sur la face au vent d'une colline il faut en tenir compte. Pour la pente du terrain, la direction exacte de la pente et son inclinaison sont nécessaires.
- **la rugosité du terrain**, c'est-à-dire un paramètre qui rend compte du type de couverture du terrain : campagne, suburbain, urbain,....

- **les obstacles**, c'est-à-dire les obstructions au vent (bâtiments, arbres,...). Les paramètres à prendre en compte sont la position et les dimensions de ces éléments.
- **la hauteur** à laquelle on évalue la vitesse du vent. Cet élément est essentiel pour tenir compte du fait que les valeurs de vent aux stations météorologiques sont toujours évaluées à 10m de haut alors que pour le confort des piétons en ville on prend en compte les vitesses du vent à 1.5m du sol. De plus, on pourrait désirer étudier le microclimat d'un lieu plus élevé que le niveau piéton : par exemple, une terrasse qui surplombe une partie de la ville,...

Certains vents régionaux existent sur une échelle davantage mésoclimatique que microclimatique. Citons par exemple :

- le mistral, d'orientation nord, il souffle violemment sur les régions du Rhône et de la Provence.
- la tramontane, très irrégulière, est un vent d'origine nord-ouest qui souffle sur le Roussillon.
- le foehn, apparaît dans les Alpes perpendiculairement aux pentes montagneuses.
- le sirocco, d'orientation sud à sud-est est chaud et méditerranéen.

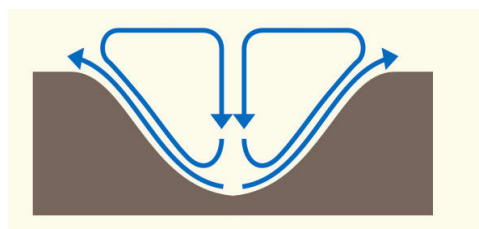
En Belgique, les vents provenant du sud-ouest sont les vents dominants au niveau mésoclimatique car ils soufflent pendant plus de 40% du temps.

Il existe différents types de vents locaux créés à une échelle microclimatique par la topographie et la nature du sol environnant :

- les brises de mer et brises de terre,
- les brises de vallées (ou de montagnes),
- les brises dues à l'urbanisation.

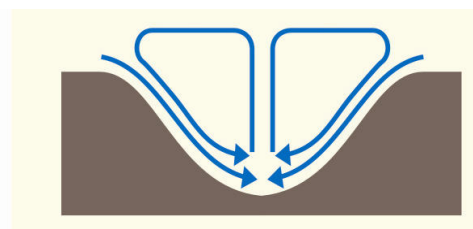
Ces courants d'air locaux font essentiellement intervenir des phénomènes journaliers. Il faut noter que ces mouvements d'air locaux peuvent accentuer, réduire les conditions de vent mésoclimatiques. Comme ils peuvent apparaître en période non venteuse du point de vue du mésoclimat, ils sont très utiles pour favoriser la ventilation naturelle des zones construites.

Sur les versants de vallées, le soleil favorise un gradient de température et donc des courants d'air durant la journée. De nuit, le gradient s'estompe et puis s'inverse légèrement, de telle sorte que l'air circule dans le sens opposé. Les brises remontent les vallées pendant la journée lorsque les sommets bénéficient d'un ensoleillement et d'un réchauffement supérieur à celui de la plaine. Par contre, l'air qui s'est refroidi descend pendant la nuit vers le fond des vallées.



Jour

(Architecture et Climat 1998).

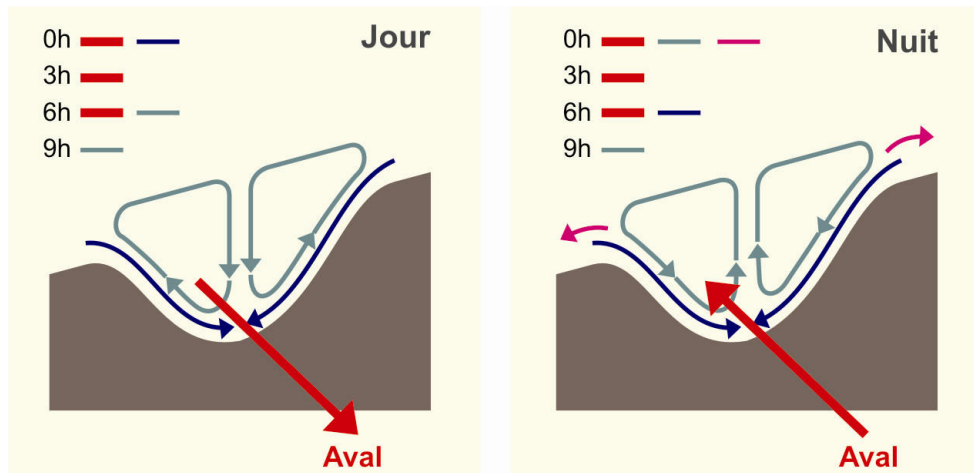


Nuit

(Architecture et Climat 1998).

Des valeurs typiques de la vitesse du vent dans ces configurations sont de 1 à 2 m/s, dépendant de l'inclinaison et de la longueur de la pente (Littlefair & al. 2000). Des vitesses de vent supérieures peuvent être générées par un relief montagneux. Les phénomènes de brise de montagne et de brise de vallée sont très sensibles aux variations d'insolation et sont beaucoup plus marqués sur les pentes exposées au sud.

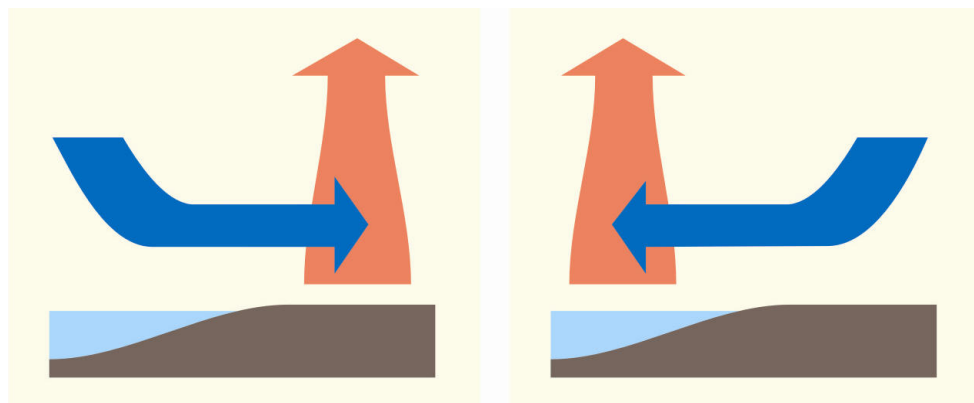
Dans les longues vallées, le phénomène expliqué ci-dessus tend à créer un mouvement d'air longitudinal d'autant plus puissant que la vallée est longue et que le gradient de température est élevé. Le dessin ci-contre illustre la complexité des mouvements d'air.



(Architecture et Climat 1998).

Le vent augmente lorsque la vallée se resserre. Si le vent mésoclimatique souffle dans la direction de la vallée, alors sa vitesse s'intensifie fortement. Cet effet de vallée se manifeste notamment pour le mistral de la vallée du Rhône. En Belgique, l'axe NE-SO favorise les courants de vallées puisqu'il est dans la direction des vents dominants, tandis qu'une vallée NO-SE perpendiculaire aux vents dominants est abritée dans le fond ainsi que sur la pente sous le vent.

Un phénomène similaire apparaît au niveau des grandes étendues d'eau. Les masses d'eau étant plus chaudes que l'atmosphère en hiver et plus fraîches en été, les courants d'air créés par le gradient thermique s'inversent au cours de l'année. Ainsi, en été, les masses d'air étant plus chaudes au-dessus de la terre qu'au-dessus des étendues d'eau, le vent souffle de la mer vers la terre; c'est l'inverse en hiver.

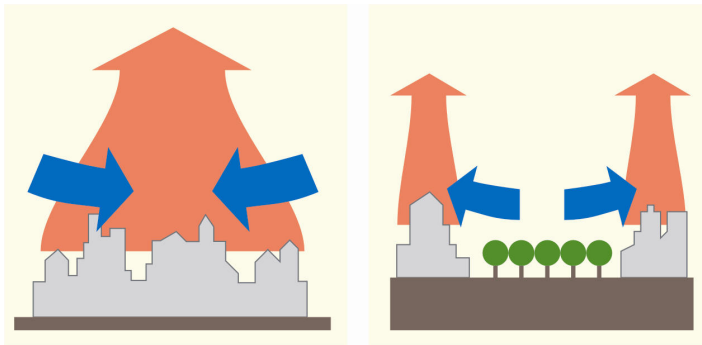


Brise de mer (en été)
(Architecture et Climat 1998).

Brise de terre (en hiver)
(Architecture et Climat 1998).

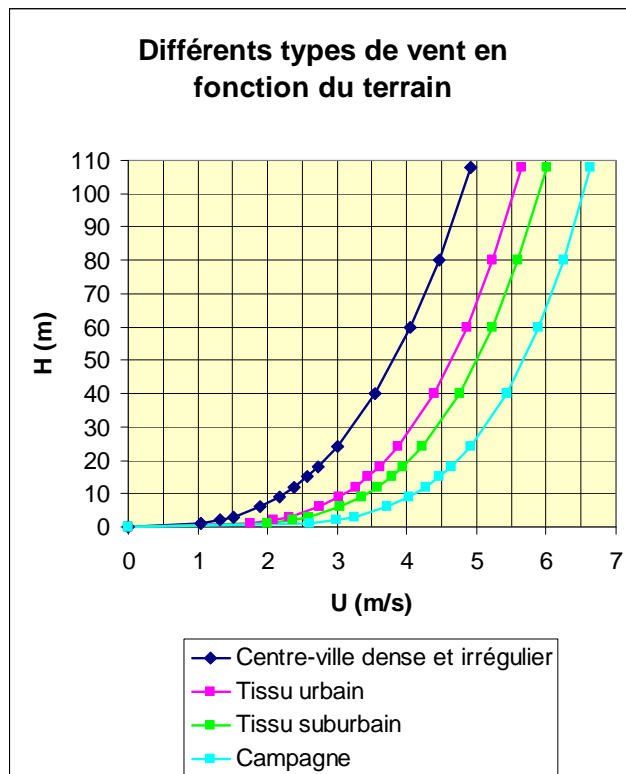
Lors des brusques variations de température, les courants d'air peuvent aussi s'inverser au cours d'une même journée. A proximité du littoral, on rencontre des vents réguliers, qui alternent selon un rythme journalier. Les brises de mer soufflent le jour et apportent les embruns marins, alors que les brises de terre, au contraire, apparaissent pendant la nuit. La brise de mer peut aller jusqu'à 40 km à l'intérieur des terres. Sa vitesse moyenne est de l'ordre de 4 à 5 m/s.. Les brises de terre sont plus faibles car la différence thermique est moins importante, leur vitesse moyenne est de 1 à 2m/s.

La température des villes étant supérieure à celle des campagnes, on y constate un mouvement d'air similaire à celui créé par les masses d'eau. L'appel d'air se dirige vers les villes dont la surface est plus chaude que la campagne. Au sein de la ville, de grands espaces dégagés permettent la création de courants d'air thermiques.

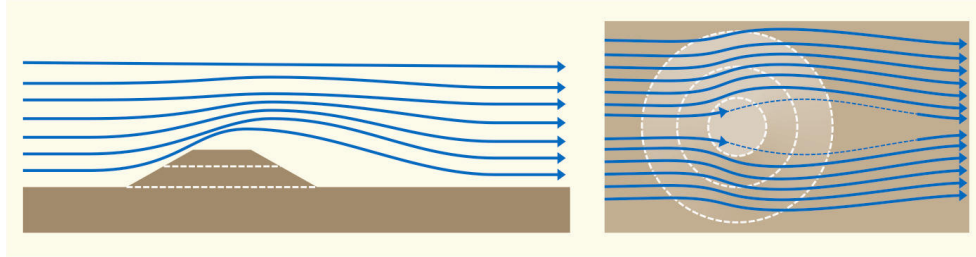


Brises urbaines (Architecture et Climat 1998).

La vitesse du vent en un lieu dépend de la longueur de rugosité du terrain et de la hauteur à laquelle la vitesse du vent est étudiée. Le graphe ci-dessous représente graphiquement les différents profils de vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol et du type de terrain.



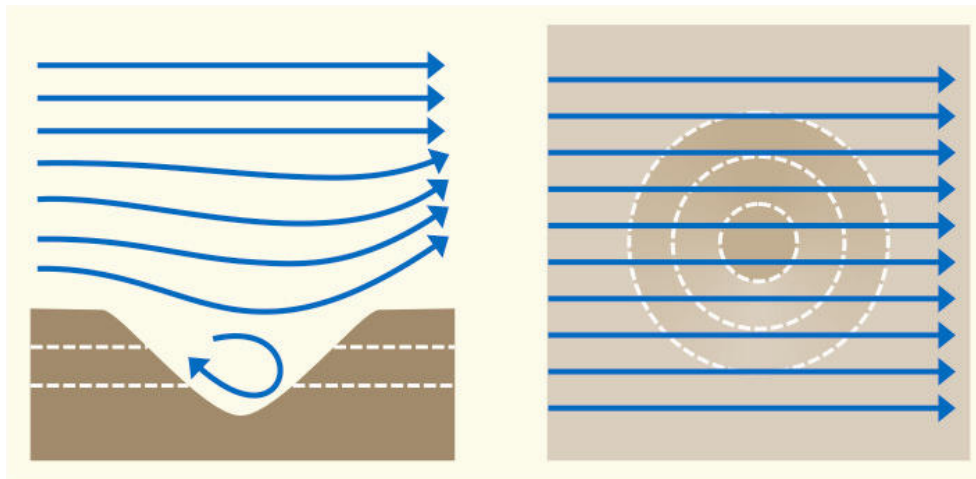
Les collines ne constituent pas à proprement parler un obstacle au vent mais elles engendrent éventuellement des modifications de son écoulement. Ces changements s'effectuent à moyenne ou grande échelle. Le relief a pour effet de protéger certains sites mais aussi d'en surexposer d'autres. Les graphes ci-dessous représentent l'écoulement du vent (en coupe et en plan) autour d'une colline. Le sommet présente généralement les vitesses de vent les plus élevées.



Coupe de la colline
(Hammoud 1986).

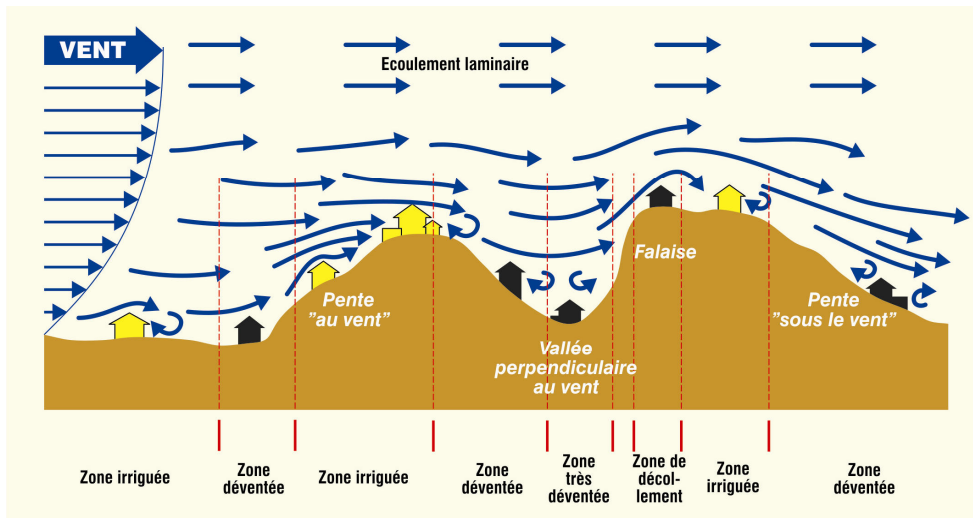
Plan de l'écoulement du vent

Les deux schémas ci-dessous illustrent le flux de vent rencontrant une dépression. L'écoulement du vent n'est pas modifié transversalement. On voit que le relief peut avoir un effet protecteur par rapport aux vents : par exemple, une vallée dont la pente est supérieure à 30% et qui perpendiculaire aux vents dominants est à l'abri de ceux-ci.



(Architecture et Climat 1998).

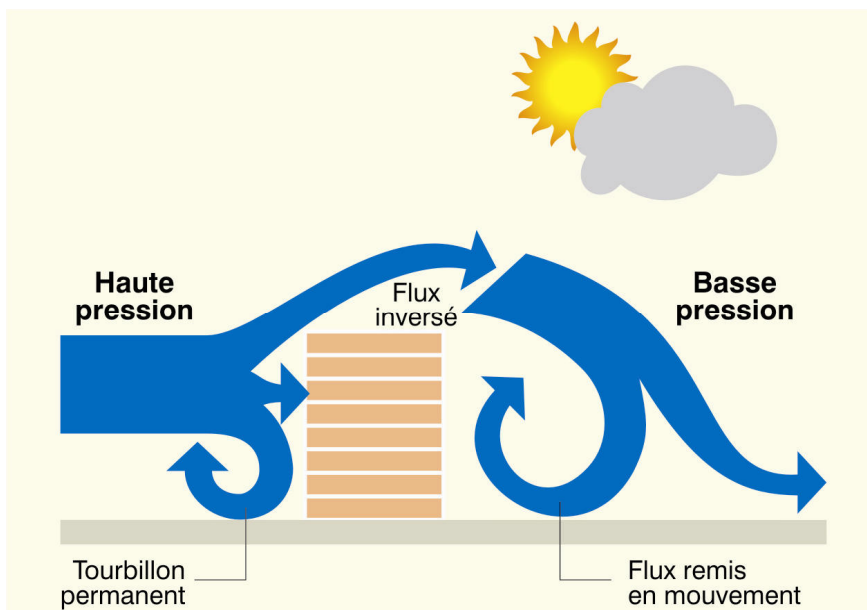
En terrain plat et dégagé de tout obstacle aéraulique, le potentiel de ventilation naturelle dépend de la fréquence des vents dominants. Une vallée parallèle aux vents dominants forme un véritable collecteur. Sur les pentes exposées au vent, le potentiel de ventilation est globalement meilleur qu'en terrain plat. La partie basse d'une pente face au vent est une zone déventée. Les pieds de collines sont donc souvent des zones déventées. En sommet de colline, il y a une accélération importante du vent ; cependant, une pente trop forte ou un effet local peut être à l'origine d'un décollement du vent induisant une zone déventée. Des zones très protégées au creux de vallées perpendiculaires aux vents peuvent aussi apparaître. Le schéma ci-dessous montre les zones fortement exposées au vent (maisons jaunes) et les zones protégées du vent (maisons noires), permettant de choisir la situation de construction en fonction du climat.



(Liébard & De Herde 2001)

Pour rappel, le vent étant freiné par les obstacles, lorsque la densité et la taille de ceux-ci sont importantes, ce qui est le cas en ville, la vitesse du vent est moindre qu'en site dégagé. Notons également que la vitesse du vent, nulle au niveau du sol, augmente avec la hauteur : c'est ce qui explique que les vitesses du vent au sommet d'un immeuble tour sont nettement plus élevées qu'au niveau du toit d'une maison qui ne comporte qu'un étage. Une formule simplifiée de calcul de la vitesse du vent en fonction du type de terrain et de la hauteur d'évaluation est donnée à la page 222 de cette thèse. Ce calcul simplifié ne prend pas en compte la présence d'obstacles (bâtiments, végétaux,...) qui peuvent freiner ou accélérer la vitesse du vent.

Lorsque le vent rencontre un obstacle, il est obligé de le contourner. La face d'un obstacle exposée au vent subit une surpression tandis que sa face opposée est soumise à une dépression. C'est pourquoi, outre la protection qu'ils offrent, les écrans peuvent également occasionner des effets secondaires tels que courants d'air et turbulences. Les mouvements d'air générés autour des bâtiments de grande hauteur sont généralement critiques pour les piétons. La zone d'influence d'un bâtiment est environ quatre fois plus longue à l'arrière d'un bâtiment qu'à l'avant.



Surpression à l'avant et dépression à l'arrière d'un bâtiment exposé au vent.

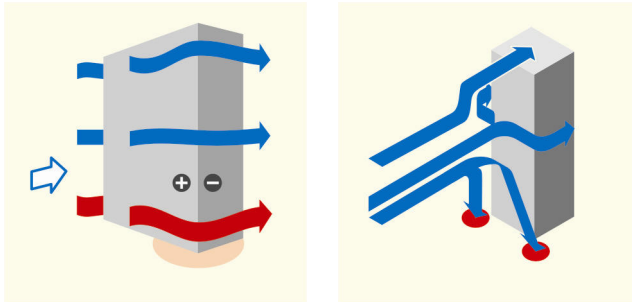
Deux catégories d'**obstacles** doivent être étudiées en fonction de leur impact sur la vitesse locale du vent : les éléments étanches à l'air (ex : les bâtiments) et les éléments poreux (ex : les arbres). Signalons que les constructions forment des écrans permanents tandis que la végétation peut présenter des variations de porosité en fonction de la saison.

Cinq mécanismes élémentaires de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples ont été répertoriés (Gandemer 1975):

- l'effet de coin,
- l'effet de sillage,
- l'effet de passage sous immeuble,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre.

Ces cinq mécanismes de base décrivent les zones critiques pour le confort des piétons. Ils sont explicités ci-dessous qualitativement et seront définis quantitativement dans le chapitre suivant. Pour chacun d'eux, des conseils pratiques de conception seront donnés pour réduire l'ampleur du problème.

L'**effet de coin** est un phénomène d'écoulement aux angles d'une construction qui met en relation des zones de surpression en amont et la zone de dépression latérale du bâtiment. Les zones critiques sont situées aux coins. La gêne due à cet effet est surtout liée à la sur vitesse engendrée. L'effet de coin est caractérisé principalement par un gradient de vitesse; les mesures de turbulence ne montrent pas d'importantes modifications.



Effet de coin (Gandemer 1975)

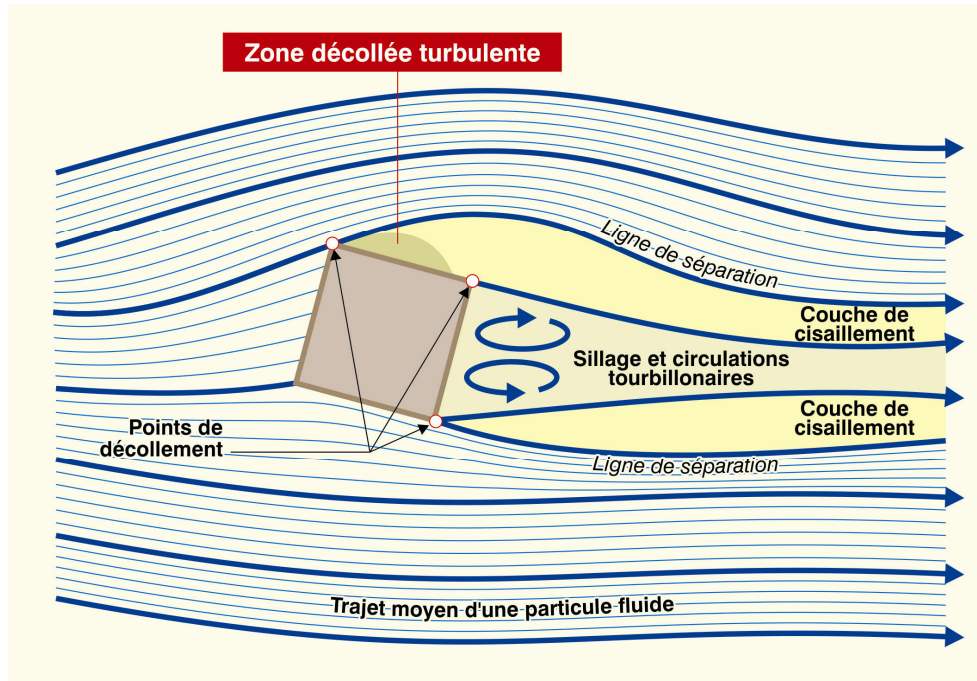
L'obstacle peut être une forme isolée (tour, parallélépipède rectangle) ou un ensemble compact de constructions. Les angles des hauts bâtiments sont souvent l'objet de vitesses de vent importantes. Il faut également faire attention aux balcons situés aux coins des bâtiments !



(Dessins : Glaumann & Westerberg 1988)

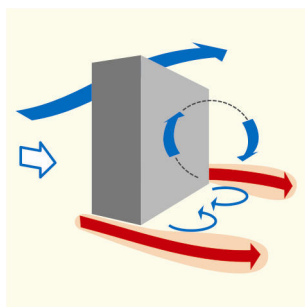
Une particularité aérodynamique induite par l'effet de coin est un gradient horizontal de vitesses très important aux environs du coin du bâtiment, ce qui est un facteur d'accroissement de l'inconfort pour les piétons.

L'**effet de sillage** couvre à la fois une zone de protection à l'arrière du bâtiment et la présence des couches de cisaillement inconfortables pour les piétons sur les côtés de celle-ci. La zone de protection au vent située dans le sillage d'un bâtiment est bordée par des zones où le gradient de vitesse du vent est important : ce sont les couches de cisaillement, qui prolongent l'effet de coin à l'arrière d'un bâtiment. Ces zones d'inconfort pour les piétons naissent aux points de séparation entre le flux d'air contournant le bâtiment et la zone protégée à l'arrière de celui-ci.



Ces zones de cisaillement, à l'arrière des bâtiments, sont plus ou moins stables et à très forts taux de turbulence ($I=0.4$) qui persistent longtemps en aval.

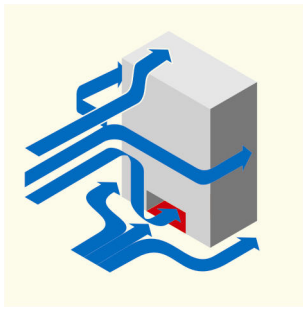
Pour les bâtiments très élevés, le sillage a une forme caractéristique de sabot de cheval. L'intérieur du sillage présente généralement des vitesses de l'air faibles mais des valeurs de turbulence élevées. Cependant, vu que les vitesses de l'air y restent très faibles, ce sont des zones qui peuvent être considérées comme très protégées et idéales pour le confort des personnes.



Couches de cisaillement en sabot de cheval à l'arrière des bâtiments très élevés. (Gandemer 1975)

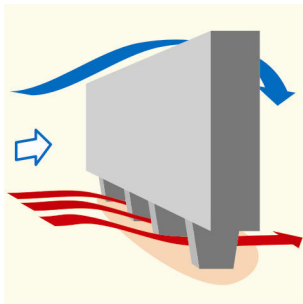
L'effet de passage sous immeuble apparaît lors de la création d'un trou sous le bâtiment ou la mise sur pilotis de l'édifice, reliant l'avant du bâtiment en surpression et son arrière en dépression. Le vent s'accélère alors en s'engouffrant au travers de ces ouvertures reliant la façade au vent et la façade sous le vent.

Des ouvertures à travers la base d'un bâtiment élevé peuvent induire de très hautes vitesses de vent à travers celles-ci. L'incidence du vent par rapport au trou joue un rôle capital sur cet effet.

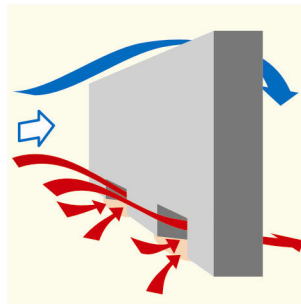


Effet de passage sous immeuble (Gandemer 1975).

Les pilotis se définissent par une porosité uniformément répartie sous la surface d'un corps de bâtiment alors que le passage sous immeuble est un trou creusé au sein d'une masse construite.



Pilotis.
(Gandemer 1975)

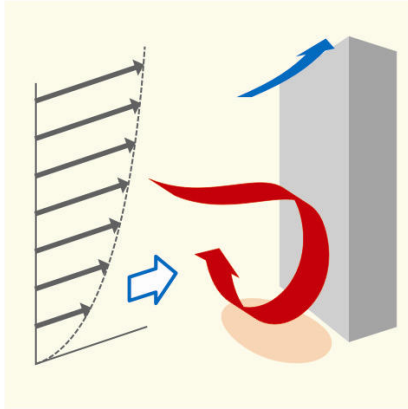


Passages.



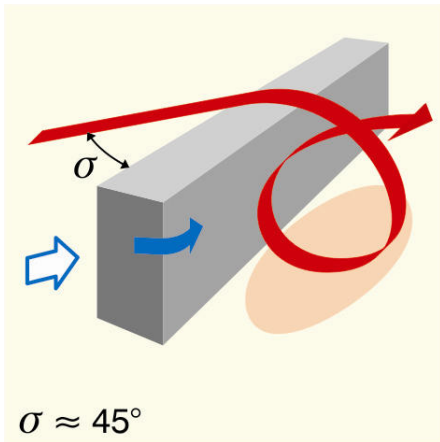
Trou sous immeuble à Louvain-la-neuve (à gauche) et pilotis de la Cité Radieuse de Le Corbusier à Marseille (au milieu et à droite). (Photos : S. Reiter).

Situé au pied du bâtiment, le **rouleau tourbillonnaire** est fonction de la hauteur du bâtiment et du profil vertical de vitesse du vent. Le tourbillon engendre une forte augmentation de la turbulence au sol.



Rouleau tourbillonnaire (Gandemer 1975)

L'**effet de barre** est une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'un élément de type barre pour une incidence de vent de l'ordre de 45 degrés. La zone critique se situe au centre arrière de la barre. Il y a création d'une zone de turbulence verticale. Les dimensions du bâtiment, principalement sa hauteur et son épaisseur, sont liées à la quantification du phénomène.



$$\sigma \approx 45^\circ$$

Effet de barre (Gandemer 1975)

Nous définissons comme barre une construction ou une succession de constructions pratiquement dans le même axe longitudinal (le décrochement transversal par rapport à l'axe longitudinal doit rester inférieur à une épaisseur). Les espacements éventuels entre les différents bâtiments constituant la barre sont d'une largeur strictement inférieure à 2 fois la hauteur des bâtiments.

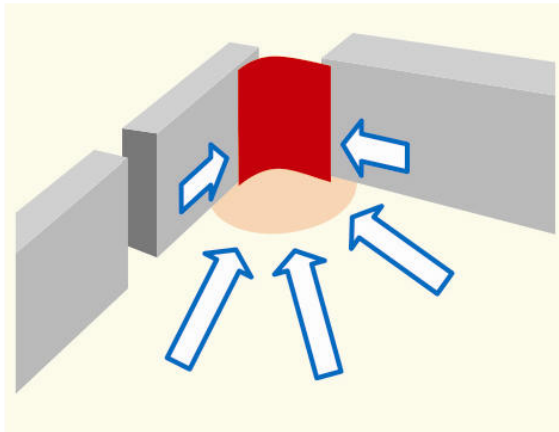
L'écoulement autour de groupes de bâtiments est le résultat de l'interaction des écoulements fondamentaux par rapport aux différents édifices. Citons quelques configurations connues de combinaisons des mécanismes de flux élémentaires sur des groupes de bâtiments (Givoni 1969 pour l'effet d'écran linéaire; Gandemer 1975 pour tous les autres effets):

- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de barre
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce (dû à un effet de liaison de zones de pression différente)
- l'effet de canalisation linéaire
- l'effet de maille

- **l'effet d'écran linéaire**
- **l'effet pyramide**

Chacun de ces mécanismes d'écoulement est explicité ci-dessous de manière qualitative. Quelques règles quantitatives et conseils pratiques seront donnés dans le chapitre suivant dans le but de limiter ou de favoriser ces effets en fonctions de leur caractéristique critique ou bénéfique du point de vue du confort au vent.

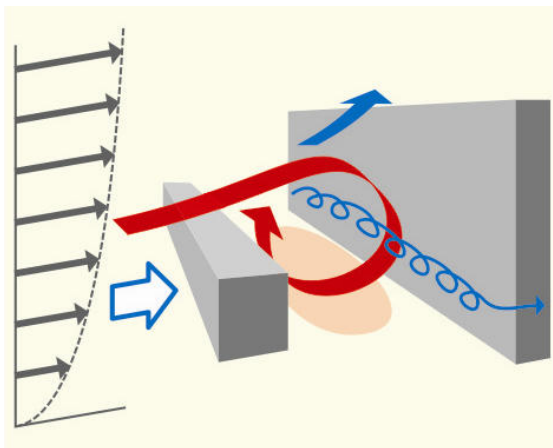
L'**effet Venturi** est un phénomène de collecteur formé par des constructions qui forment un angle ouvert au vent. La zone critique pour le confort se situe à l'étranglement, là où la vitesse du vent est maximale.



Effet Venturi (Gandemer 1975).

Le collecteur générant un effet Venturi peut aussi être constitué d'un ensemble de bâtiments non jointifs, dans la mesure où l'axe des bras est maintenu et où les ouvertures, dans les bras, ont une largeur nettement inférieure à la hauteur moyenne de ceux-ci.

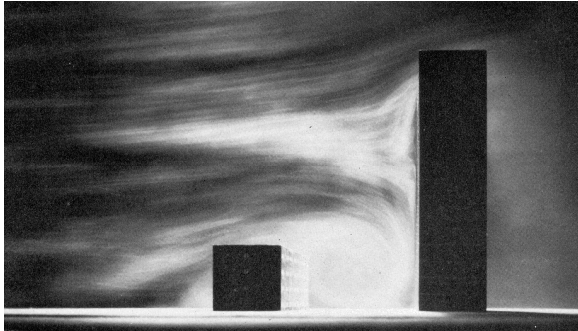
L'**effet Wise** est un effet de tourbillon au pied de tours lorsqu'une autre construction plus basse est placée parallèlement et en amont de la construction élevée.



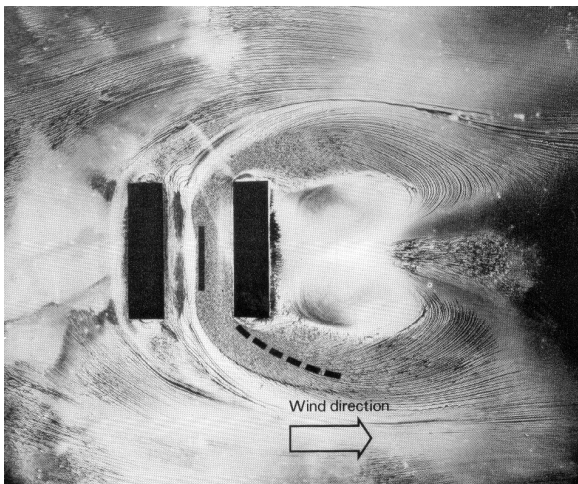
Effet Wise (Gandemer 1975).

Il faut aussi noter que cet effet tourbillonnaire est spécialement gênant pour les piétons en raison de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique.

Les photos ci-dessous ont été prises dans un tunnel à vent ; il s'agit d'un effet Wise typique. La fumée permet de visualiser le vent qui souffle de gauche à droite.



Effet Wise en coupe (Penwarden & Wise 1975)

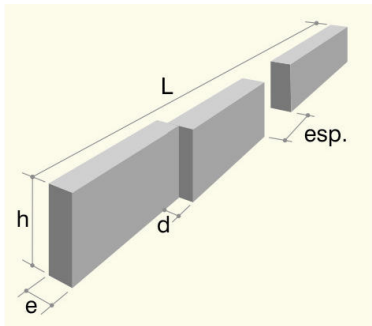


Effets Wise en plan (Penwarden & Wise 1975)

Sur la photo montrant l'effet Wise en plan, une ligne continue et une ligne en pointillés représentent les zones les plus critiques pour le confort des piétons dans cet ensemble de deux bâtiments ; il s'agit :

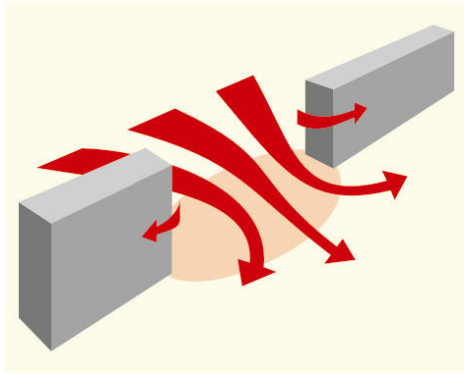
- de la survitesses due à l'effet Wise (ligne continue),
- de la survitesses maximale due à l'effet de coin au pied du bâtiment très élevé (pointillés).

L'effet de barre généré par un ensemble de bâtiments correspond au même principe que l'effet de barre pour un bâtiment isolé mais les dimensions de la barre sont déterminées par la juxtaposition de différents bâtiments.



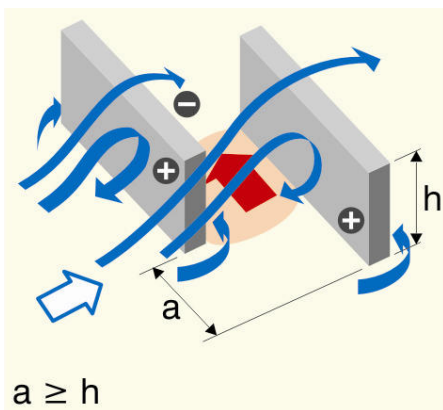
Ensemble de bâtiments pouvant générer un effet de barre (Gandemer 1975).

L'espacement entre deux barres peut engendrer un **effet de double coin**. Les espaces entre les bâtiments sont souvent des accélérateurs de vent.



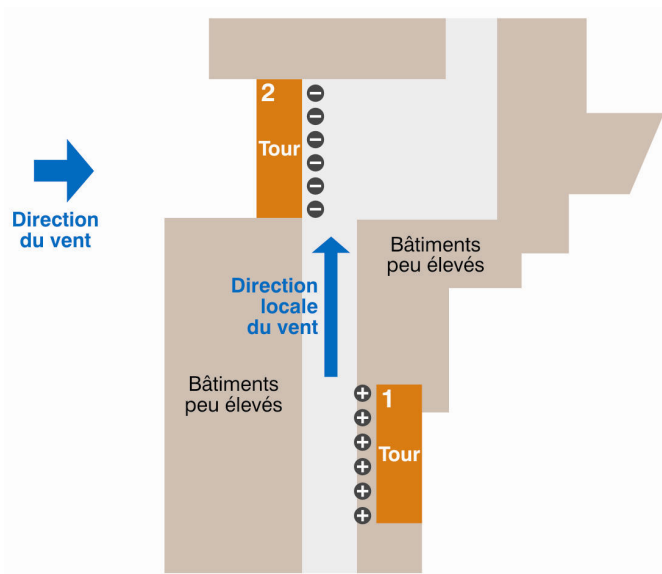
Effet de double coin (Gandemer 1975).

Si, au sein d'un plan masse, des bâtiments se trouvent placés en quinconce, sous une incidence du vent voisine de la normale, un phénomène d'écoulement entre les zones de pression différente (sens des pressions décroissantes) est formé. Cette anomalie, baptisée **effet de bâtiments en quinconce**, due à un effet de liaison de zones de pression différente, affecte tout le couloir de liaison.



Effet de bâtiments en quinconce (Gandemer & Barnaud 1975).

Ainsi le plan ci-dessous formé de bâtiments peu élevés et de deux tours finement hachurées (bâtiments 1 et 2) verra se développer un mouvement d'air pouvant être fort allant de la zone au vent du bâtiment en surpression 1 à la zone sous le vent du bâtiment 2 en dépression.



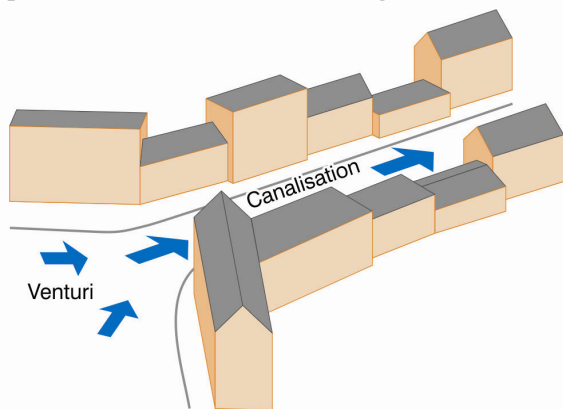
Effet de bâtiments en quinconce (Penwarden & Wise 1975).

Ainsi, les phénomènes d'interaction du vent dans les ensembles d'immeubles-tours sont fréquents. Les groupes de bâtiments de grande hauteur demandent un soin tout particulier de la part du concepteur si l'on veut atteindre un niveau de gêne tolérable (il ne nous paraît pas possible de faire mieux) aux pieds de ce type de constructions.



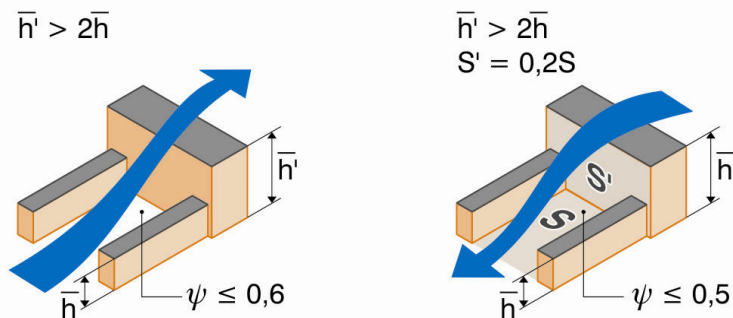
Tours à Brisbane. (Photo : K. de Myttenaere).

Lorsqu'un ensemble construit forme une canalisation à ciel ouvert, cette configuration de bâtiment peut former un effet critique du point de vue du vent : l'**effet de canalisation linéaire**, si les bâtiments ne sont pas suffisamment espacés. Une canalisation linéaire n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique (comme par exemple un effet Venturi) qu'elle transmet sur toute sa longueur.



Effet de canalisation linéaire (Gandemer 1975).

L'**effet de maille** est une zone de protection par rapport au vent qui est créée par la juxtaposition de bâtiments qui forment une alvéole ou une poche. Les intérieurs d'îlots créent en général un creux au centre d'un bloc construit qui coïncide souvent avec l'effet de maille. L'écoulement du vent et le confort des piétons dans cette zone dépendent des dimensions toutefois du périmètre construit et de la hauteur des bâtiments qui constituent la maille.

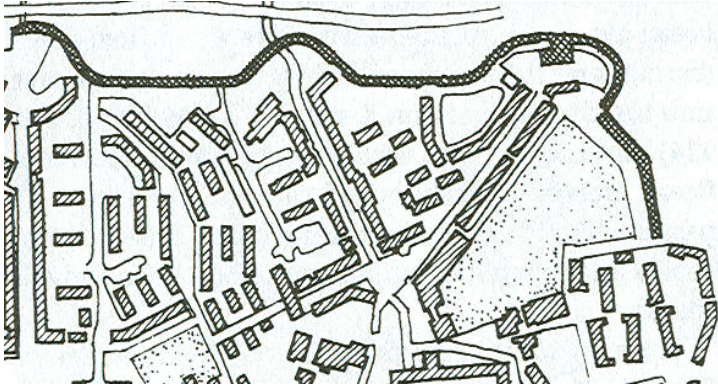


Effet de maille (Gandemer 1975).

L'**effet d'écran linéaire** est l'effet de protection généré dans le sillage de rubans construits de grande longueur placés perpendiculairement aux vents dominants. Il s'agit donc de l'agrandissement de l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment ou d'un brise-vent par la création d'un écran continu face au vent.

Les études ont montré qu'un bâtiment long et continu placé comme façade au vent par rapport à une zone urbaine peut réduire les vitesses de vent entre les bâtiments de ce quartier jusqu'à 15% dans la direction du vent obstruée. (Givoni 1969)

↓ Direction du vent.



Effet d'écran linéaire (Plan : Brown & Dekay 2001)

L'**effet de pyramide** est un effet aéraulique provoqué par un groupement de constructions à caractère pyramidal. Les formes pyramidales, par leur géométrie assez aérodynamique n'offrent pas de résistances brutales au vent (continuité dans les évolutions de hauteur) et associées à leur rugosité de surface, représentée par les décrochements de niveaux et terrasses, semblent dissiper le maximum d'énergie du vent dans tous les azimuts. Par suite, au niveau du sol, les flux sont relativement peu rapides et le niveau du confort est généralement bon.



Effet de pyramide (Gandemer & Barnaud 1975).

D'une façon générale, ce mode de construction rend acceptable des hauteurs de bâtiments qui seraient inconfortables sans l'utilisation de cet effet. Il est toutefois indispensable d'étagérer le plus possible les niveaux, d'obtenir aux angles de la pyramide des niveaux très bas (voisins de 3m), de densifier l'environnement proche (constructions basses ou végétation) au niveau des coins globaux ainsi que de traiter avec soin les balcons au vent et au voisinage des crêtes: volumétrie aérodynamique ou garde-corps déflecteur,...

Les **effets spécifiques du vent en milieu urbain** dense sont développés dans le paragraphe 3.2.4 sur la modification des mouvements d'air en zone urbaine.

Il faut signaler que les effets que nous avons identifiés pour les bâtiments isolés et les groupes de bâtiments n'apparaissent souvent que pour certaines orientations de vent. Dans la réalité, le vent peut provenir de multiples orientations. Prenons l'exemple de deux bâtiments situés en parallèle l'un par rapport à l'autre; pour une orientation perpendiculaire, nous pouvons trouver un effet de type Wise ; sous une orientation parallèle, un effet de double coin et pour les orientations intermédiaires, on pourra trouver des combinaisons d'un effet de barre et d'un effet de double coin. La difficulté de la prédétermination du vent dans un milieu construit réel provient souvent de ces **combinaisons d'effets**. Il est dès lors important de passer en revue l'ensemble des possibilités de création de ces différents mécanismes de base, pour toutes les orientations de vent, pour chaque projet. Si le milieu est trop complexe, il est nécessaire de réaliser une simulation CFD détaillée ou un essai en soufflerie aérodynamique.

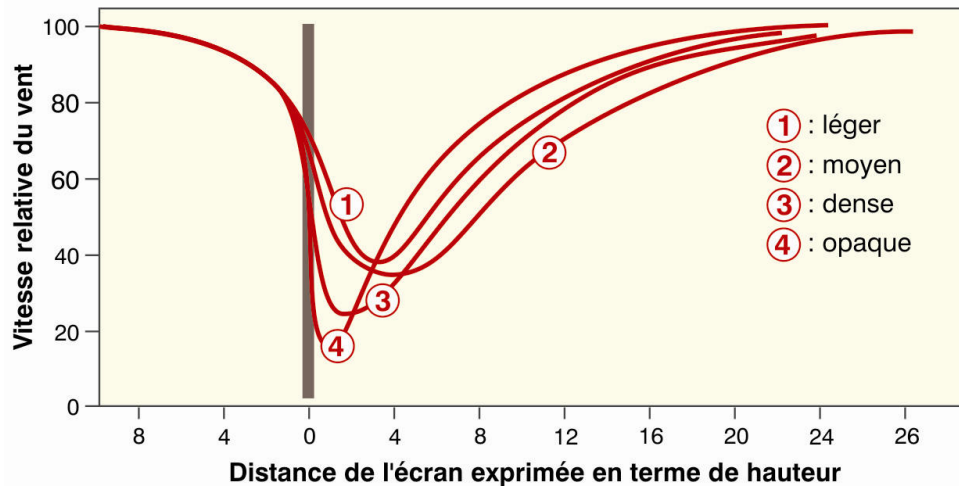
Les fonctions d'un **brise-vent** sont multiples (Gandemer & Guyot 1981):

- freiner les flux d'air en introduisant sur leur chemin une dissipation d'énergie cinétique en laminant, par exemple, les écoulements à travers des orifices ou encore en augmentant le frottement du sol par le jeu de la rugosité.
- casser la turbulence par réduction des dimensions des tourbillons. La viscosité de l'air introduit un amortissement d'autant plus rapide sur la turbulence que les tourbillons sont petits. Les toiles métalliques ou les filets remplissent remarquablement bien ce rôle.
- guider les écoulements au profit de secteurs non affectés par le vent grâce à un jeu de profilage des obstacles ou de mouvements de terrain.
- détruire par éclatement tridimensionnel (divergence du flux dans toutes les directions) toutes organisations et concentrations des écoulements. L'association de sculptures ou de mobilier urbain de grandes dimensions peuvent parfaitement remplir cette fonction.

Le brise-vent, par sa présence, modifie le cadre de son implantation. Une manière de réussir son intégration est de lui faire jouer en plus de son rôle de brise-vent un ou plusieurs rôles complémentaires. On peut citer par exemple les fonctions suivantes : écran acoustique, ombrage, sculpture plastique, mobilier urbain, écran visuel, structure de jeux, protection contre la pluie, division de l'espace,... De plus, une recherche multifonctionnelle permettra parfois de réduire son coût. Par conséquent, loin d'alourdir le cahier de contraintes que rencontrent les concepteurs, les brises-vent peuvent devenir le support d'une nouvelle expression architecturale et même un élément stimulateur de l'urbanisme bioclimatique.

Pour des brise-vents dont la longueur est supérieure à 12H, les deux seuls paramètres importants pour déterminer la réduction des vitesses du vent sont la hauteur du brise-vent et sa porosité.

Le graphique ci-dessous présente les réductions de la vitesse de l'air devant et derrière un brise-vent de longueur supérieure à 12 fois sa hauteur et compare l'efficacité de la protection générée par des obstacles de différentes porosité, regroupés en quatre catégories : obstacle léger, moyen, dense ou opaque. Les valeurs sont données pour une hauteur de 1.5m par rapport au sol. Les écrans denses provoquent une forte réduction de la vitesse du vent sur une faible profondeur tandis que les écrans perméables réduisent la vitesse du vent dans une moindre mesure mais sur une profondeur plus importante.



Effet d'un brise-vent en fonction de sa porosité (Gandemer & Guyot 1981).

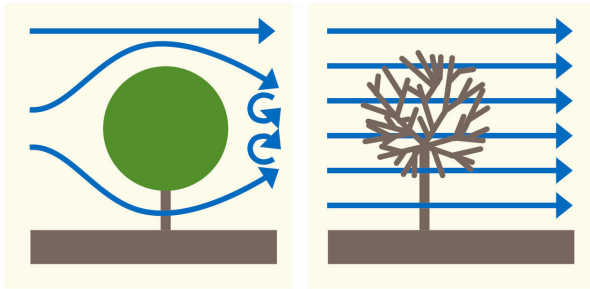
Généralement, on commence à percevoir l'effet de protection du brise-vent à environ une fois sa hauteur en amont mais surtout dans son sillage aval. Il faut attendre environ 20 fois la hauteur de la structure pour retrouver les caractéristiques de l'écoulement amont non perturbé (Gandemer & Guyot 1981). L'efficacité d'un écran est régie par ses dimensions et sa perméabilité. Les brise-vents doivent être évalués en fonction de leur hauteur, longueur, nature (porosité) et de la direction du vent. Il est toutefois important de vérifier qu'un élément de protection au vent ne crée pas des effets secondaires tels qu'une déviation du vent vers une localisation où il serait encore plus gênant.

Pour obtenir une forte réduction du vent sur une longueur suffisante, la porosité optimale des brise-vents est de 10 à 25% (Gandemer & Guyot 1981), ce qui correspond dans le graphe ci-dessus aux brise-vents denses et moyens. Si la préférence est donnée à une réduction maximale des vitesses du vent sur une courte distance, un écran dense est idéal. Par contre, si la préférence est donnée à la taille de la zone abritée, une perméabilité moyenne de l'écran est conseillée. En effet, une même réduction de la vitesse du vent de 10% est atteinte jusqu'à une distance égale à 12H si l'écran est opaque, 16H si le brise-vent est dense et 20H si l'obstacle est de densité moyenne. Les obstacles très légers (perméabilité de 70%) créent une protection réduite tant au niveau de la surface protégée que de l'amplitude de la réduction des vitesses de l'air.

En résumé, lorsque la zone à protéger est relativement réduite, la porosité est un paramètre essentiel et il faut privilégier les brise-vents légèrement poreux (< 15%). Par contre, pour ralentir le vent sur une grande superficie, la hauteur du brise-vent est l'élément prédominant. La porosité devient alors un paramètre moins important mais il faut de préférence choisir une perméabilité moyenne (15-25 %).

Pour les brise-vents minces, qu'ils soient artificiels ou naturels, la porosité optique du brise-vent correspond à sa porosité aérodynamique. Pour des barrières végétales très larges, la porosité aérodynamique est supérieure à la porosité optique et elle doit être évaluée spécifiquement. Toutefois, ce type de brise-vent est généralement utilisé pour l'agriculture et non dans le cadre d'un contexte urbain ou suburbain. En général, pour réduire les vitesses de vent autour des bâtiments, on recommande l'utilisation de barrières végétales d'une largeur de 0.2 à 0.3 fois leur hauteur, ce qui correspond bien à la haie traditionnelle. Pour les arbres, l'atlas éolien européen considère qu'une apparence très dense correspond à une porosité inférieure à 0.35, une apparence dense à une porosité comprise entre 0.35 et 0.5 et une apparence

dégagée à une porosité supérieure à 0.5. Un arbre qui a perdu ses feuilles présente une porosité de 70% et un arbre isolé avec feuilles de 50%.

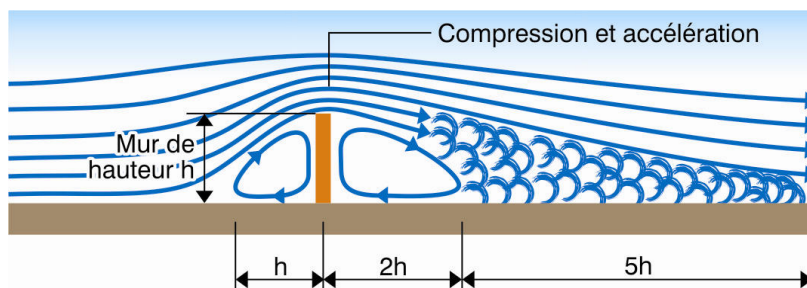


Influence du feuillage sur l'écoulement du vent.

Une légère diminution de la vitesse du vent a lieu jusqu'à une distance égale à environ 25 fois la hauteur du brise-vent. Par contre, la protection réelle couvre une distance plus courte. Pour un brise-vent dense, la vitesse du vent est réduite de 40% jusqu'à une distance égale à 8H et de 20% jusqu'à une distance de 12H.

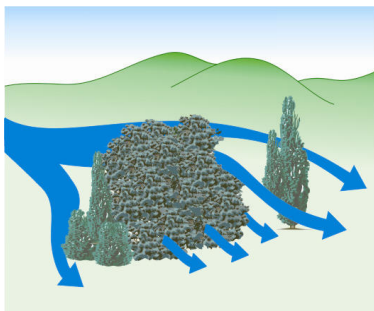
Différents types d'écrans végétaux et artificiels peuvent être mis en place pour dévier les mouvements d'air et servir de brise-vents. Nous passons en revue ci-dessous les différents types de brise-vents et leurs caractéristiques.

Qu'il s'agisse d'un mur, d'un talus ou d'une palissade jointive, un **obstacle plein** ne constitue pas un bon brise-vent. L'écoulement du vent autour d'un obstacle étanche à l'air est du même type que celui qui se produit autour des bâtiments. A l'avant, il y a une surpression qui fait s'élever l'écoulement d'air au-dessus de l'obstacle. A l'arrière, il y a une masse d'air relativement immobile en dépression sur une longueur environ égale à deux fois la hauteur de l'obstacle, derrière laquelle le vent redescend pour former des tourbillons qui s'étendent jusqu'à une distance égale à cinq fois la hauteur de l'obstacle.



Écoulement du vent autour d'un obstacle plein (Fontaine 1984).

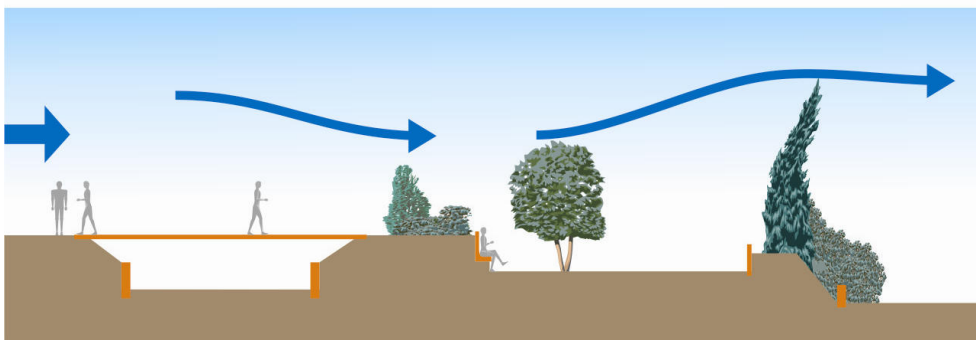
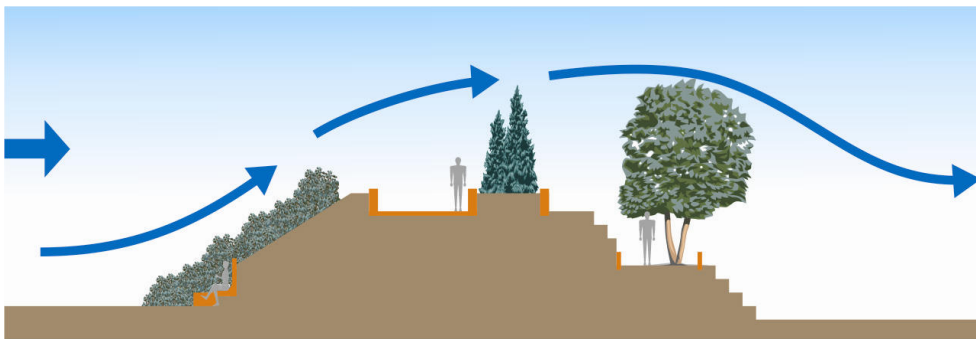
La **végétation** peut être utilisée comme une protection contre les vents. Haies, alignements d'arbres, essences grimpantes augmentent la rugosité à l'écoulement de l'air : la vitesse du vent est réduite et les déperditions par convection des bâtiments diminuent.



Écoulement du vent à travers un obstacle végétal (Izard & Guyot 1979).

Une grande variété de végétation (buissons, arbres et arbustes) peut être utilisée pour réaliser les écrans végétaux. Ce type d'écran au vent a du charme et permet une composition variée de l'espace et du paysage. En outre, la richesse de ses autres qualités bioclimatiques en font un élément de traitement privilégié pour les espaces extérieurs ; citons notamment l'ombrage et le dosage de la lumière, la limitation de l'échauffement des revêtements de surface, l'humidification et l'assainissement de l'air, la fixation des sols et le frein à son érosion, l'intimité visuelle, sa naturalité dans un contexte urbain, etc. Les principes aérodynamiques suivants doivent toutefois être respectés pour qu'un écran végétal serve réellement de brise-vent :

- Les écrans végétaux doivent présenter une perméabilité plus ou moins homogène sur toute leur hauteur. Ainsi, le pied des arbres ou des arbustes doit être garni par d'autres types de végétation (buissons, taillis,...) pour que l'ensemble forme un brise-vent efficace.
- La perméabilité optimale au vent correspond à un pourcentage de vide visuel nul ou faible. Par conséquent, la constitution des rideaux végétaux devra être dense.
- L'efficacité optimale est obtenue, comme dans le cas des écrans artificiels, pour une incidence orthogonale par rapport au vent. Il faut donc prendre en compte l'écoulement du vent critique le plus habituel sur le site considéré. D'autre part, dans le cas de brise-vent végétaux, il sera parfois nécessaire de prévoir un « bouclier » au vent permettant la croissance de l'écran végétal lors de sa plantation.
- Dans la pratique, le végétal voit son effet de protection contre le vent accru lorsqu'il est associé à d'autres interventions aérodynamiques telles que des mouvements de terre, des rocailles, des écrans artificiels (mobilier urbain, sculptures, écrans acoustiques,...).



Écoulement de l'air lié à la végétation et aux mouvements du terrain (Gandemer & Guyot 1981).

Il est très important de bien choisir la **porosité** des brise-vents végétaux. S'ils ne sont pas assez perméables à l'air, on revient au cas des obstacles pleins qui créent de la turbulence. Par contre, si on laisse passer trop d'air, le vent n'est pas ralenti et le brise-vent est inutile. Les plantations à feuilles caduques offrent une meilleure protection estivale qu'hivernale.

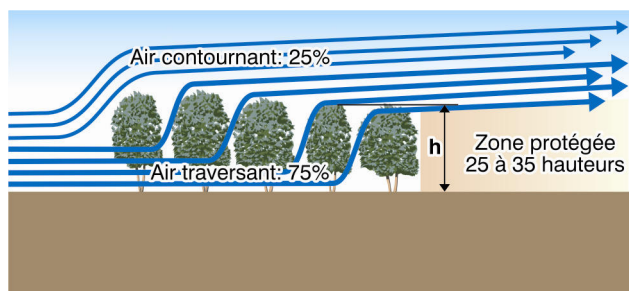


(Liébart & al. 1996)

Les différents types de **brise-vents végétaux** couramment utilisés sont :

- *La bande boisée, perméable et large .*

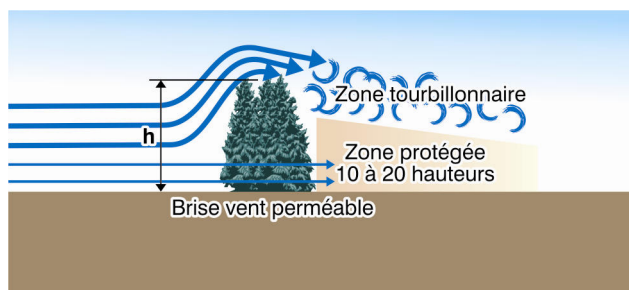
Une bande boisée, d'une épaisseur de 10 m de large au moins, dont la base est garnie (buissons, repousses, taillis, ...), est le brise-vent le plus efficace. L'air s'y engouffre presque totalement sans provoquer de turbulences, puis s'éliminera progressivement vers le haut. A l'arrière, aucune turbulence n'apparaît et la zone protégée s'étendra sur 25 à 35 fois la hauteur du bois.



Effet d'une bande boisée large et perméable sur l'écoulement du vent (Fonaine 1984).

- *Les haies :*

Plus simples à planter que les bandes boisées et tout de même très efficaces: zone protégée sur 10 à 20 hauteurs. Seul problème, les haies sont rarement très hautes et il est difficile de protéger une maison derrière, mais elles conviennent admirablement pour un jardin.



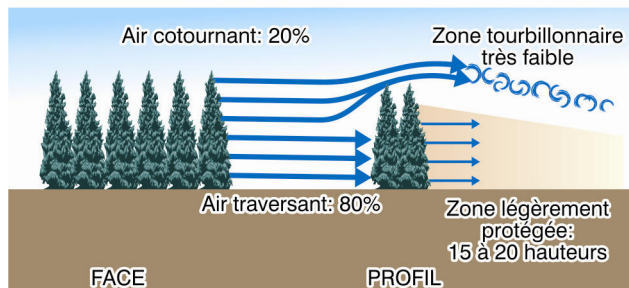
Effet d'une haie perméable sur l'écoulement du vent (Fontaine 1984).

Les haies dont le pourcentage de vide visuel est pratiquement nul donneront une protection identique à celle d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi=0.2$. Pour un pourcentage de vide visuel de l'ordre de 1/3 (identification des formes derrière l'obstacle végétal), les haies donneront une protection identique à celle d'un écran

mince de porosité géométrique $\Phi=0.5$. Pour des haies de perméabilité visuelle de l'ordre de 50 à 60%, ce qui est le cas par exemple des haies à feuilles caduques en hiver, l'effet de protection est très limité et correspond environ à l'efficacité d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi=0.7$. Pour une perméabilité visuelle supérieure à 60%, l'effet de protection au vent est quasiment inexistant (Gandemer & Guyot 1981).

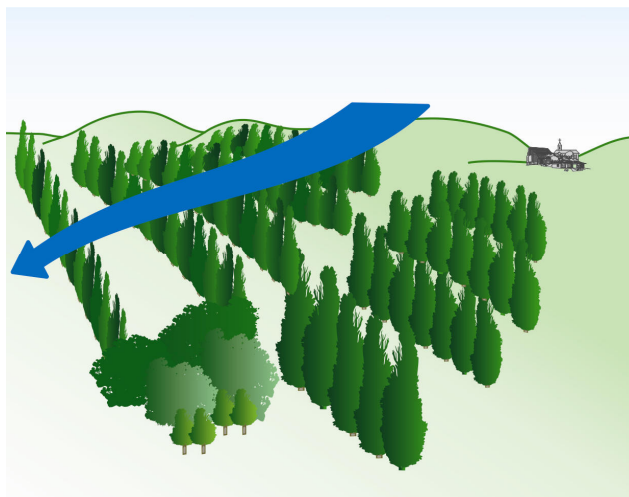
➤ *Les arbres en bande :*

L'efficacité d'un brise-vent dépend finalement de sa perméabilité qui s'exprime par le pourcentage de vides. Pour une perméabilité de 20 à 30% (correspondant à un perchis de feuillus en été), la zone protégée est de 15 à 20 hauteurs et la vitesse du vent est environ diminuée de moitié. Pour une perméabilité de 80% (correspondant à un perchis de feuillus en hiver), la vitesse du vent est seulement réduite de 20%.



Effet de rangée d'arbres (Fontaine 1984).

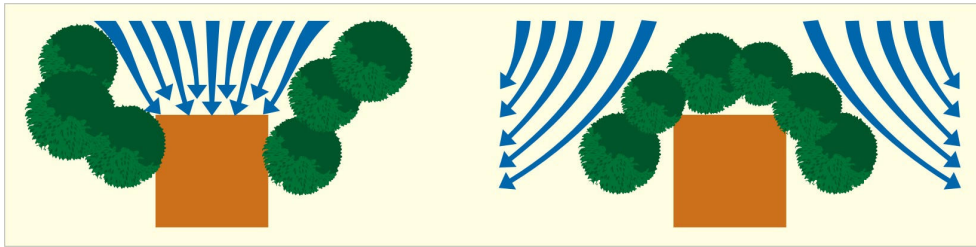
Le maillage agricole de la plaine de Crau en est un exemple. Des bandes végétales successives protègent les cultures du mistral. Leur orientation préférentielle est de l'axe est-ouest, l'espacement de ces barrières végétales varie en général de 5 à 10 fois leur hauteur.



Maillage végétal de la plaine de Crau pour protéger les cultures du mistral (Izard & Guyot 1979).

Lorsqu'il s'agit d'arbres à haute tige offrant une base dégarnie, une partie de l'écoulement d'air comprimé à l'avant passe en dessous de l'arbre provoquant même parfois une accélération du vent sous l'arbre et à l'arrière de celui-ci sur une distance de une à deux fois la hauteur du tronc dégarni. Ce type d'arbres mis en bande ne peut pas être considéré comme un brise-vent au niveau des piétons. Dans ce cas, il faut ajouter des arbustes, buissons ou haies au niveau de la tige des arbres pour compléter la protection au vent.

La végétation peut aussi servir à guider le vent dans la direction souhaitée...



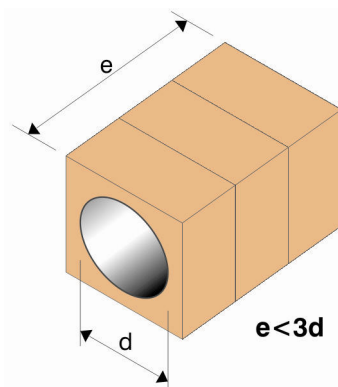
L'utilisation de la végétation comme guide aéraulique.

Des **brises-vents artificiels perméables** peuvent aussi être placés dans les espaces publics pour limiter la vitesse du vent, casser les turbulences de grande dimension ou guider le flux d'air.



L'arche de la Défense à Paris (Photo : S. Reiter).

D'une façon générale, la définition de la porosité géométrique d'un brise-vent artificiel gardera son sens physique tant que l'épaisseur du matériau restera inférieure à 3 fois le diamètre du trou, comme indiqué sur le dessin ci-dessous. Dans le cas de structures épaisses où les orifices ont une profondeur supérieure à 6 fois le diamètre du trou, la porosité géométrique effective du matériau devra être multipliée par un coefficient de forme de l'ordre de 0.6 pour retrouver la porosité équivalent à celle d'un écran plan mince (métallique ou filet). De plus, pour une porosité globale donnée, la répartition des orifices doit être la plus homogène possible. Il est conseillé de choisir le diamètre des orifices dans la gamme 2cm à 15cm. Pour assurer un meilleur confort des usagers, la perméabilité de la protection doit être aussi homogène que possible et avoir des orifices ou mailles de dimensions relativement petites (5 cm x 5 cm) vis-à-vis du corps humain. Pour des formes d'orifices particulières, il faudra avoir recours aux aérodynamiciens pour estimer la perméabilité effective. (Gandemer & Guyot 1981)



Dimensions permettant la définition de la porosité géométrique d'un brise-vent (Gandemer & Guyot 1981).

Des **brise-vents mobiles** peuvent être employés pour créer un barrage de l'air froid en hiver, tout en canalisant le vent en été et en offrant la possibilité de créer un ombrage adaptable.

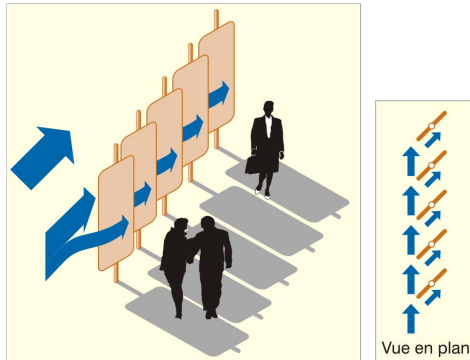
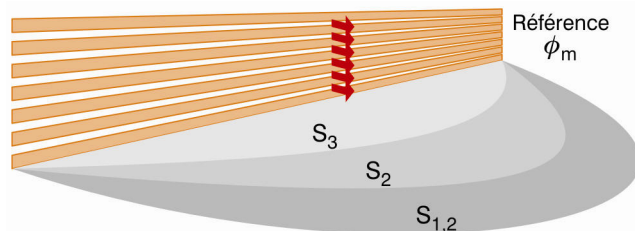


Illustration d'un brise-vent mobile.

Le graphique ci-dessous montre les différentes zones de protection au vent générées par la présence d'un brise-vent perméable. (Gandemer & Guyot 1981)



Zones de protection générées par un brise-vent perméable (Gandemer & Guyot 1981).

Nous pouvons dimensionner ces zones en fonction de la perméabilité du brise-vent et de ses dimensions (H et L). Les aires maximales de protection S1.2 ; S2 et S3 peuvent être déterminées pour une incidence du vent nulle par rapport au brise-vent et en fonction du type de vent (campagne ou ville).

Les expressions empiriques suivantes permettent d'évaluer les surfaces protégées du vent S1.2 et S2 en fonction de h (la hauteur du brise-vent), L (la longueur du brise-vent), Φ (la perméabilité du brise-vent), θ (l'incidence du vent par rapport à la normale au brise-vent) et K (le facteur de site selon le tableau ci-dessous). Rappelons que la surface S1.2 est bonne pour la marche mais qu'une surface S2 est nécessaire pour le confort des zones de détente avec station immobile prolongée. (Gandemer & Guyot 1981).

$$S_{1.2} = 16.5 h^{0.6} L (-2.7 \Phi^2 + 2.5 \Phi + 1) K$$

$$S_2 = 1.6 h^{0.7} L^{1.3} (-7 \Phi^2 + 3.6 \Phi + 1) \cos^2(\theta) K$$

Dans tous les cas, si $\Phi \geq 0.7$, alors $S_2 = 0$.

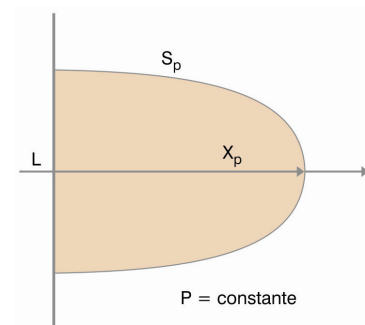
Le paramètre K prend en compte l'effet de la rugosité du terrain (et donc du profil de vent induit) et la perméabilité du brise-vent sur son effet de protection (Gandemer & Guyot 1981) :

Type de vent	Porosité moyenne de l'écran Φ	Facteur K
Vent de campagne	Toutes les porosités (entre 0 et 0.7)	1
Vent en zone urbanisée	0.2	0.8
	0.5	0.7

Ainsi, pour une perméabilité du brise-vent de 20%, la réduction des aires protégées en vent de ville par rapport au vent de campagne est de 20%. Par contre, pour une perméabilité de l'écran de 50%, cette réduction de l'effet de protection de l'écran atteint 30% en vent de ville par rapport à un vent de campagne.

Après avoir déterminé par ces formules les aires de protection au vent derrière un brise-vent en m², on peut aussi obtenir la distance maximale de protection (x_p dans le schéma ci-dessous) pour un vent perpendiculaire au brise-vent. Ainsi, x_p peut être évalué comme étant le demi-axe d'une ellipse dont l'autre axe est le brise-vent. On obtient ainsi x_p à partir de la formule suivante et de la valeur S calculée par une des deux formules ci-dessus selon le critère de protection désiré. (Gandemer & Guyot 1981).

$$x_p \geq \frac{4S}{L\pi}$$



Définition graphique de x_p (Gandemer & Guyot 1981).

Cette approche est réaliste pour $L > 40\text{m}$. Pour des brise-vents plus courts, la ventilation transversale du sillage est très marquée, ce qui atténue l'effet de protection. Pour $L \leq 40\text{m}$, cette approche reste valable pour S_2 et x_2 par contre pour $S_{1,2}$, il faut alors réduire la valeur calculée de 30%, ce qui a aussi une répercussion sur $X_{1,2}$. (Gandemer & Guyot 1981).

Pour une incidence du vent θ entre 10 et 30°, l'aire de la surface protégée est plus petite et oblique, inscrite dans un triangle dont un des côtés est formé par le brise-vent et l'angle aigu qui le forme est déterminé en retirant 2θ de la normale à ce brise-vent du côté le plus proche du vent. Sous une forte incidence du vent ($\theta > 45^\circ$), bien qu'il subsiste encore une petite zone protégée (influence du frottement sur la rugosité notamment) on peut estimer que l'écran a perdu sa fonction de brise-vent (Gandemer & Guyot 1981).

Signalons que les brise-vents naturels conservent une efficacité supérieure par rapports à des écrans minces artificiels lorsque le vent vient de manière oblique par rapport au brise-vent (Heisler & Dewalle 1988).

Il faut enfin ajouter une remarque importante par rapport à l'influence de l'environnement bâti immédiat sur l'efficacité des brise-vents et plus particulièrement à leur application dans un contexte urbain. L'estimation des aires protégées selon les formules ci-dessus ont été élaborées dans le cas de brise-vents isolés, sans environnement proche, en présence d'un vent statique (campagne ou ville) ; c'est-à-dire qu'aucun sillage ou effet de masque particulier n'est venu altérer le fonctionnement du brise-vent. Au cœur d'un plan masse, les caractéristiques de l'écoulement alimentant le brise-vent vont être dépendantes du vent mais aussi de l'environnement immédiat qui se combine avec la présence de l'écran. Dans ce cas, nous vous renvoyons au paragraphe traitant des spécificités des mouvements d'air en milieu urbain (3.2.4).

Le vent est un facteur climatique important dans la détermination des besoins en énergie d'un bâtiment. Il influence le taux d'infiltration d'air du bâtiment, les possibilités de ventilation naturelle et les échanges de chaleur par convection à la surface de l'enveloppe des bâtiments peu isolés surtout s'ils comportent des vitrages simples ou même des vitrages doubles mais qui ne sont pas basse émissivité.

Nous nous posons la question de l'implantation idéale d'une construction pour limiter **les dépenses énergétiques liées aux mouvements d'air**. Faut-il se placer dans les parties les plus venteuses pour maximiser la ventilation naturelle ou garder une certaine couverture pour limiter les pertes par infiltration? La suite de ce paragraphe va tenter d'apporter des éléments de réponses à cette question.

La **pénétration de l'air** dans les bâtiments, qu'elle soit voulue et contrôlée (ventilation) ou involontaire (infiltration) représente une part importante de la consommation globale d'un bâtiment. Pour s'en convaincre, effectuons un rapide calcul comparant les déperditions annuelles par l'enveloppe et le renouvellement hygiénique de l'air pour un immeuble type.

Imaginons un bâtiment de bureau bien isolé de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux en site ouvert. La surface de déperdition vaut $750 \text{ m}^2 + (750 \text{ m}^2 * 0.33) + (130\text{m} * 3\text{m} * 5) = 2950 \text{ m}^2$, en appliquant un coefficient 0.33 pour la surface en contact avec le sol, les déperdition y étant plus faibles. Supposons des pertes moyennes à travers la paroi de $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, ce qui correspond à un bâtiment assez bien isolé. Pour les valeurs de température moyennes à Uccle, c'est-à-dire une température intérieure de 19°C et une température extérieure de 6.5°C , les déperditions seront de $0.6\text{W/m}^2\text{K} * 2950\text{m}^2 * 12.5\text{K} = 22.1\text{kW}$, ce qui représente, sur une saison de chauffe (5800 heures à Uccle), $22.1 \text{ kW} * 5800\text{h} = 128\,325 \text{ kWh}$.

Le simple renouvellement d'air hygiénique, s'il représente un taux de renouvellement de 0.75 volume d'air par heure, pour un volume d'air équivalent à 80% du volume total et une période d'occupation de 2500 heures, avec une différence de température de 10K (moyenne sur un an) demandera l'apport annuel de $0.75 * 1/\text{h} * 0.8 * 11250\text{m}^3 * 3.3 * 10^{-4} \text{ kWh/m}^3\text{K} * 2500\text{h} * 10\text{K} = 55\,687 \text{ kWh}$, ce qui correspond à plus de 40 pourcents des déperditions par l'enveloppe.

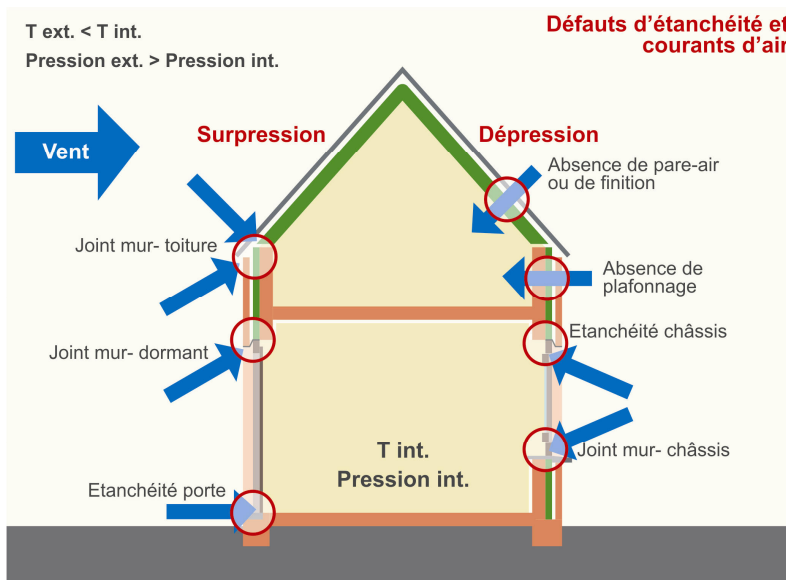
La prise en compte des gains solaires et internes, en diminuant le besoin de chauffage, et le développement d'un refroidissement par une ventilation naturelle iront encore davantage dans le sens d'une plus grande part relative de la demande énergétique liée à la ventilation par rapport au chauffage. A la lecture de ce calcul, nous ne pouvons douter du soin avec lequel la ventilation, qu'elle soit purement sanitaire ou qu'elle fasse activement partie de la régulation thermique du bâtiment, doit toujours être conçue et réglée. En outre, plus l'enveloppe est isolée, plus la part relative aux déperditions par renouvellement d'air augmente dans le bilan global.

Dans tous les bâtiments, il y a de l'air qui entre et qui sort d'un bâtiment de façon incontrôlée : il s'agit des **infiltrations** par les fissures, les trous et à travers les matériaux. Le taux d'infiltration dépend de la porosité du bâtiment et de la force du vent ainsi que des gradients de températures. Les infiltrations peuvent diminuer l'efficacité d'une ventilation, provoquer une surconsommation d'énergie, voir une incapacité à assurer des conditions de confort.

Un débit de $35 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une simple fissure de 1m de long est une moyenne raisonnable. Ce débit représente à lui seul un besoin d'énergie annuel de $35\text{m}^3/\text{h} * 8760\text{h}/\text{an} * 10\text{K} * 3.3 * 10^{-4} \text{ kWh/m}^3\text{K} = 1012 \text{ kWh}/\text{an}$, soit l'énergie consommée par une ampoule de 100 watts pendant 14 mois.

La gestion de l'air intérieur et de ses mouvements peut aussi éviter une surconsommation de chauffage, par un meilleur contrôle des infiltrations. Celles-ci varient de 0.1 renouvellements d'air par heure pour un bâtiment étanche à 3 renouvellements pour un bâtiment peu étanche. Pour le bâtiment de bureau de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux qui nous a déjà permis de donner des valeurs de consommations chiffrées, simplifions le calcul en prenant un volume d'air de 10 000 m³. Ce bâtiment induit donc sur un an (en prenant 10K de différence entre l'air intérieur et extérieur) une consommation de 10 000 kWh si les infiltrations sont limitées à 0.1 renouvellements d'air par heure (bâtiment étanche) et monte jusqu'à 300 000 kWh si le passage d'air à travers les infiltrations atteint 3 renouvellements d'air par heure (bâtiment peu étanche). L'impact du passage de l'air par infiltrations sur la consommation globale d'un bâtiment est donc loin d'être négligeable !

L'infiltration de l'air dans un bâtiment dépend de la qualité d'exécution de celui-ci. Ces infiltrations s'observent souvent dans certains détails de construction. Le graphe ci-dessous représente les défauts de construction typiques qui génèrent des pertes d'énergie par infiltration.



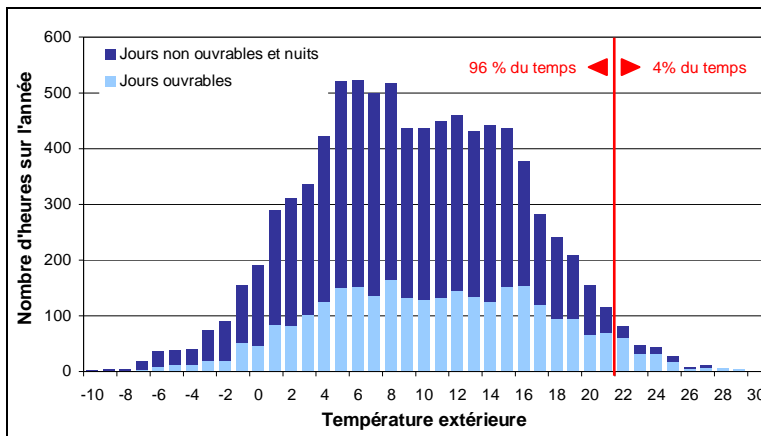
(Gratia & De Herde 2002).

La ventilation est le processus par lequel de l'air "propre" est intentionnellement amené dans un espace et de l'air vicié en est extrait. Qu'elle soit mécanique ou naturelle, la ventilation permet avant tout le contrôle de la qualité de l'air (par la dilution des polluants, des odeurs, etc.) et du confort thermique (par le contrôle de la température, du taux d'humidité et de la vitesse de déplacement de l'air dans un local). Le tableau ci-dessous montre les exigences en matière de débits d'air pour la ventilation de base (renouvellement d'air hygiénique) selon la norme belge NBN D50-001.

Tableau : Exigences de débit d'air selon la norme NBN D50-001.

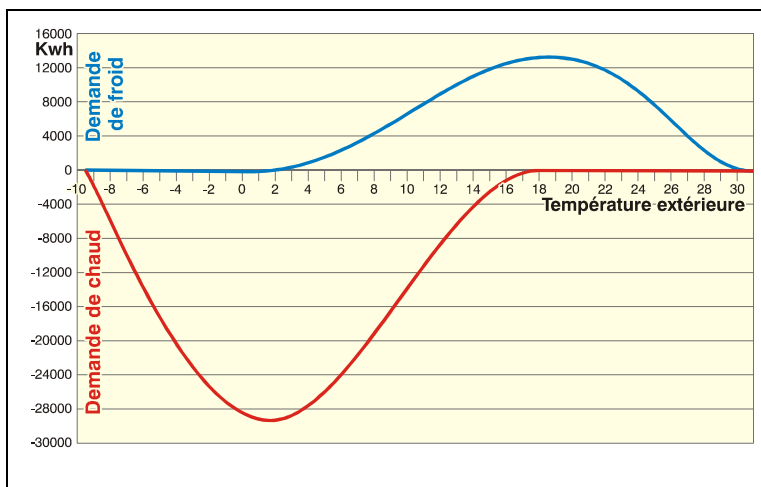
Exigence de base	$3.6m^3/hm^2$	
Exigence complémentaire	minimum	maximum
Living	$75m^3/h$	$150m^3/h$
Chambre à coucher	$25m^3/h$	$36m^3/h$
Salle de bain, cuisine fermée	$50m^3/h$	$75m^3/h$
Cuisine ouverte	$75m^3/h$	–
Toilettes	$25m^3/h$	–

La ventilation naturelle peut être un moyen efficace de refroidissement des bâtiments. Différentes techniques sont développées en ce sens. Dans les pays tempérés, la climatisation (système HVAC) est surexploitée dans les bâtiments tertiaires (immeubles de bureaux, ...). Pour assurer le refroidissement des bâtiments par une ventilation naturelle nocturne, l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur entre le jour et la nuit doit être importante c'est-à-dire d'au moins 5 degrés (Roulet 2004). En pratique, on estimera le confort comme satisfaisant si une simulation dynamique (basée sur une année climatique-type) prévoit au maximum 100 heures par an au-dessus de 25,5°C, dont 20 heures maximum au-dessus de 28°C. En Belgique, la température extérieure de l'air est inférieure à celle d'un bâtiment (entre 21 et 25°C) pendant la majorité de l'année. La température extérieure dépasse 22°C durant 300h/an, soit 4% du temps, et elle dépasse 24°C durant 150 h/an, soit 2 % du temps...



Occurrence des températures extérieures pendant une année type moyenne en Belgique (Architecture et Climat 2004).

Un bâtiment n'est pas refroidi uniquement lorsque la température extérieure est élevée. Suite aux apports internes (occupation, bureautique,...) et aux apports solaires, un bâtiment isolé est aussi refroidi alors qu'il fait frais dehors. C'est ce que montre le schéma suivant pour un bâtiment de bureau. Il reprend pour chaque niveau de température extérieure, la somme des demandes de chaud et de froid sur une année type. Sur l'ensemble des heures de l'année pendant lesquelles la température extérieure était de 12°C, le bâtiment de bureau étudié a eu besoin de 9.500 kWh de froid et de 8.000 kWh de chaud.



Demandes annuelles de chaleur et de froid d'un bâtiment de bureau en Belgique en fonction de la température extérieure. (Architecture et Climat 2004).

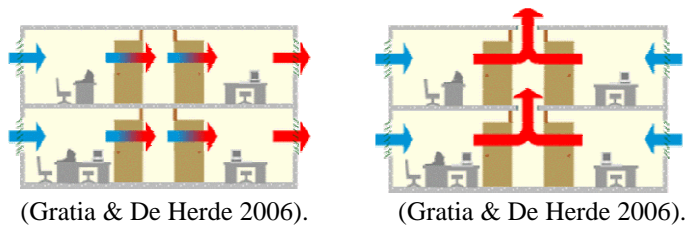
Une partie non négligeable de la demande de froid peut donc être satisfaite, en Belgique, en valorisant cet air frais extérieur, ce qui entraîne de considérables économies d'énergie. Le refroidissement actif peut même être totalement éliminé, remplacé par une ventilation naturelle de nuit, éventuellement complétée par une ventilation naturelle de jour. La ventilation naturelle est très appréciée par les occupants qui se plaignent parfois du bruit et des problèmes de santé liés au refroidissement mécanique. Ils apprécient tout particulièrement la possibilité d'ouvrir leurs fenêtres.



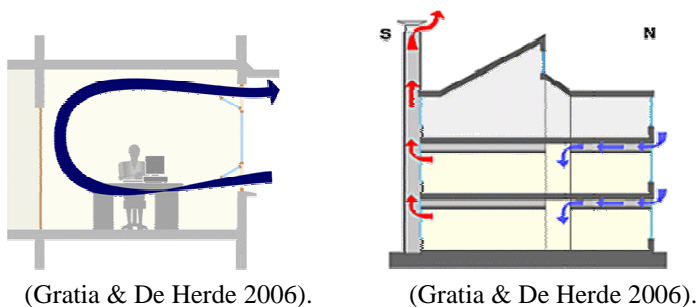
Ainsi, créer un microclimat plus proche des températures du confort humain place d'emblée le bâtiment dans une plage qui nécessite moins de consommations d'énergie car il offre la possibilité de valoriser la fraîcheur de l'air pendant les périodes de refroidissement du bâtiment et de limiter les déperditions dues à la ventilation et aux infiltrations pendant les périodes de chauffage du bâtiment.

Pour rester dans des limites du confort intérieur, le taux de renouvellement d'air généralement admis pour effectuer la ventilation diurne est de 4 volumes/heure, alors que durant la nuit, celui-ci est de 8 volumes/heure.

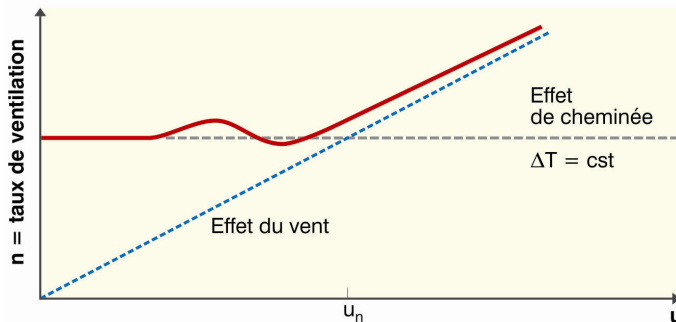
Le refroidissement naturel des bâtiments est assuré grâce à une combinaison entre l'effet du vent et le tirage thermique (effet de cheminée). Le vent tend à pousser l'air de la façade au vent à la façade sous le vent. Le tirage thermique tend (si l'intérieur est plus chaud que l'extérieur) à pousser l'air de bas en haut d'un bâtiment.



Le débit d'air de ventilation dû à l'effet de cheminée augmente avec la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ainsi qu'avec la différence de hauteur des ouvertures. Cet effet peut donc être maximisé par l'ajout d'un conduit de cheminée qui permet de créer une ouverture au-dessus des toits, donc plus élevée.

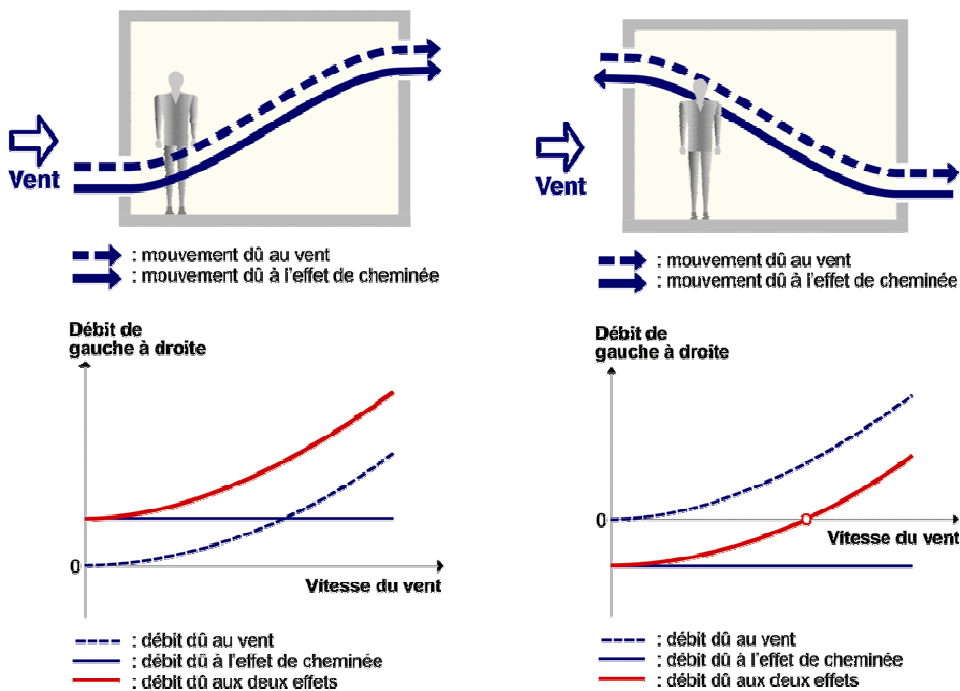


La comparaison de l'effet du vent et de l'effet de cheminée sur une fenêtre est représentée dans le graphe ci-dessous. Ce schéma montre qu'il existe une vitesse critique telle que les pressions dues au vent et à l'effet de cheminée sur une fenêtre soient identiques. Au-dessus de cette vitesse critique, le vent l'emporte ; en-dessous de cette vitesse limite, c'est l'effet de cheminée qui prédomine (Voos 1978).



(Voos 1978)

Parfois, l'effet de cheminée et l'effet du vent se renforcent ; parfois, ils sont en opposition. L'effet total ne se calcule pas simplement par une somme ou une différence algébrique des deux effets ; c'est ce que montrent les deux graphes ci-dessous. Si les ouvertures de ventilation sont placées de manière favorable l'effet du vent s'ajoute au tirage et la ventilation est renforcée. Si les ouvertures sont placées de manière défavorable ou si le vent souffle dans le mauvais sens, le vent contrarie le tirage et la ventilation est réduite, voire tombe à zéro pour une certaine vitesse de vent. Il convient donc de placer les ouvertures de ventilation des espaces traversants (en contact avec deux façades) face aux vents dominants. (Gratia & De Herde 2006)



A gauche : exemple où l'effet du vent et l'effet de cheminée se renforcent ; à droite : exemple d'opposition entre l'effet du vent et l'effet de cheminée. (Gratia & De Herde 2006)

Certaines formes de bâtiments favorisent le refroidissement naturel par rapport à d'autres. Citons par exemple le fait d'avoir une profondeur de bâtiment assez faible pour pouvoir créer une ventilation transversale.

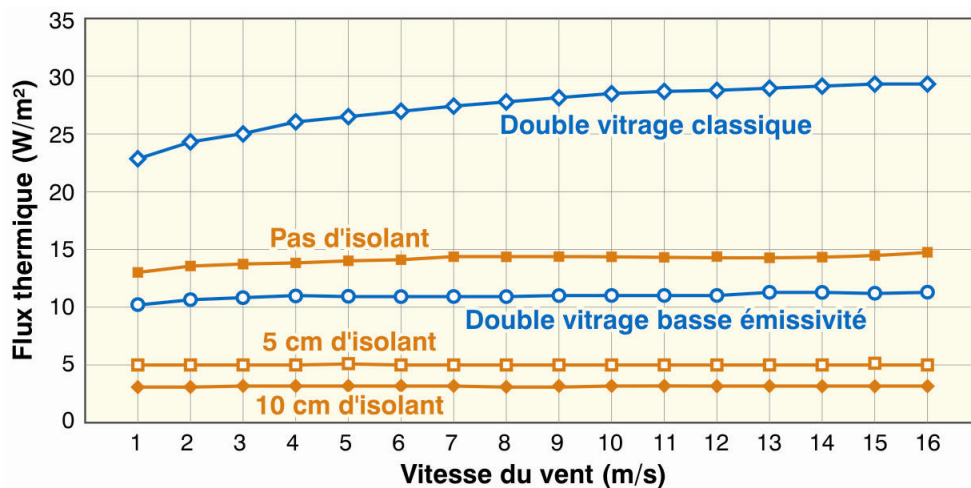
Si l'on veut accroître les possibilités de refroidissement naturel des bâtiments, l'orientation du vent devrait de préférence être oblique (30° à 60°) par rapport à leurs façades principales pour favoriser leur ventilation naturelle. En revanche, les infiltrations sont maximales pour un vent à 45° par rapport au bâtiment. Il y a donc un conflit d'intérêt entre la limitation des infiltrations et le refroidissement à l'aide de la ventilation naturelle des bâtiments. Pour des bâtiments isolés, il est donc important de veiller à ce qu'ils soient bien étanches si on les place à 45° des vents dominants; parfois, il sera même nécessaire d'implanter de la végétation pour ralentir la vitesse du vent. En revanche, dans un milieu urbain relativement dense, nous recommandons de favoriser la ventilation naturelle vu que le tissu urbain sert déjà de protection au vent et ralentit sa vitesse moyenne.

Le **transfert de chaleur par convection** entre une paroi et un écoulement d'air est exprimé par la formule suivante :

$$Q = h S (T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}})$$

où h est le coefficient d'échange thermique par convection et S la surface d'échange.

La figure ci-dessous représente les déperditions thermiques d'un mur creux classique, d'un double vitrage classique et d'un double vitrage basse émissivité en fonction de la variation de la vitesse du vent et pour une différence constante de température entre l'intérieur et l'extérieur de 10°C. Ce graphe montre que les variations de la vitesse du vent n'ont quasiment pas d'influence sur les déperditions globales d'un mur creux isolé ou un vitrage basse-émissivité. Elles ont une légère influence sur la consommation des murs non isolés et une influence non négligeable sur les doubles vitrages classiques.

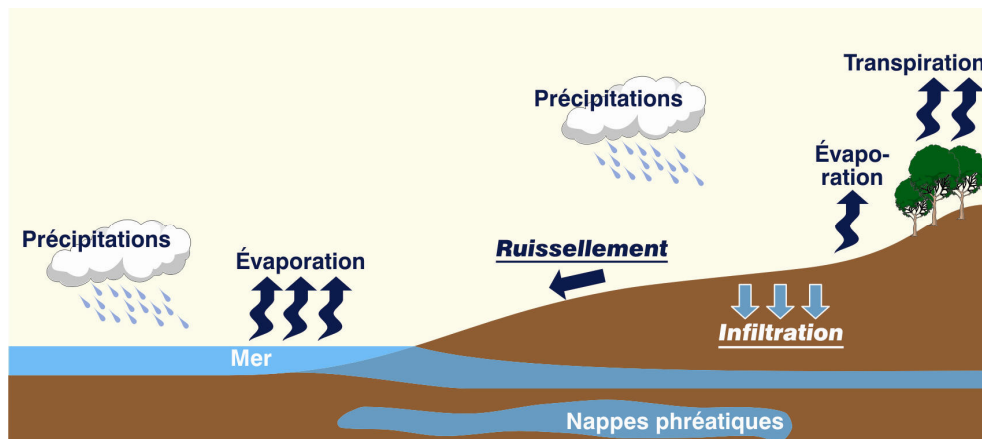


Flux thermique à travers un mur creux et un vitrage en Belgique selon la vitesse du vent. (van Moeseke 2004).

Nous constatons donc que le vent n'a que peu d'influence sur les déperditions thermiques par les murs en période de chauffe du bâtiment. En outre, cette influence est d'autant plus faible que la paroi est isolée. Concernant les fenêtres, la généralisation de vitrages basse-émissivité diminuerait encore plus l'influence du vent. C'est donc davantage dans ses effets sur la ventilation et les infiltrations que le vent influence les consommations d'énergie des bâtiments que par les pertes par convection des bâtiments.

L'humidité et les précipitations locales

Expliquons le cycle naturel de l'eau tel qu'il devrait toujours se produire. Le Soleil fournit à l'eau l'énergie nécessaire à son évaporation. L'eau des océans et des lacs s'évapore dans l'air, se condense en fines gouttelettes en suspension et forme les nuages. L'énergie solaire réchauffe l'atmosphère terrestre créant des pressions et dépressions capables de faire circuler ces énormes masses d'eau sous forme de nuages. Lorsque ces nuages rencontrent une dépression ou un refroidissement, les molécules d'eau changent de phase, se liquéfient et créent les précipitations. Ensuite, mue par la gravité, l'eau ruisselle, ravine le sol ou s'y infiltre en modelant tous les paysages de la Terre. La végétation absorbe une partie de l'eau de surface et de l'eau contenue dans le sol pour sa croissance. Cette eau absorbée est restituée à l'atmosphère par l'évapo-transpiration des végétaux. La majeure partie des eaux de pluie s'infilte dans le sol et alimente les nappes phréatiques. Une autre partie de ces eaux ruisselle vers les lacs, les mers et les océans. Le cycle est accompli.

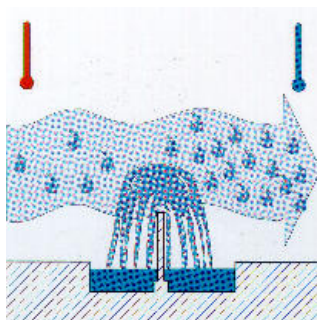


Le cycle naturel de l'eau.

Ainsi, le cycle naturel de l'eau régénère près de 600 000 km³ chaque année, soit 0.04% de la quantité globale d'eau du globe. L'eau douce des rivières se mêle donc à l'eau salée des mers et l'eau salée s'adoucit en s'évaporant grâce à l'énergie solaire. L'eau douce se recycle lentement mais ne disparaît jamais.

Des déséquilibres importants peuvent toutefois apparaître dans ce cycle naturel dès que l'homme perturbe l'une des phases de son développement. C'est malheureusement souvent le cas pour les urbanisations de grande taille.

L'humidité relative de l'air est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur à la température ambiante et la quantité maximale (niveau de saturation) qu'il peut contenir à cette même température. Les surfaces d'eau, les fontaines et la présence d'une végétation dense contribuent à l'évaporation et donc humidifient l'air.



Humidification de l'air par une fontaine

Il faut aussi noter que des sources de vapeur d'eau artificielles peuvent exister, telles que les tours de refroidissement des industries ou un usage extensif de refroidisseurs par évaporation.

Par contre, la concentration de vapeur d'eau diminue fortement avec l'altitude. Dans un relief montagneux, le versant au vent reçoit plus de pluie et le versant sous le vent beaucoup moins.

Le brouillard prévaut dans les vallées et les dépressions. Il apparaît souvent dans les zones côtières où un air très humide entre en contact avec les surfaces plus froides de la terre (Geiger 1980). En périphérie des grandes agglomérations, le brouillard et les précipitations sont plus importants qu'au centre des villes ou à la campagne (Merlin & Choay 1996).

3.2 Spécificités du microclimat urbain

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat changer au rythme de l'activité humaine. Les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui modifient le microclimat urbain. Des éléments urbanistiques tels que la minéralisation généralisée des sols ou la présence de bâtiments élevés ont également un impact fondamental sur les modifications des différents paramètres climatiques en ville. En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesses de vent plus faibles mais turbulences plus élevées, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air,...

Les modifications du climat urbain par rapport aux données climatiques moyennes provenant des stations météorologiques sont représentées dans le tableau ci-dessous. Les chiffres donnés sont basés sur une comparaison réalisée par Landsberg des valeurs mesurées en ville par rapport aux moyennes (sur 30 ans) hors milieu urbain sur un très grand nombre de villes autour du monde. (Landsberg 1981)

Paramètres du microclimat	Valeurs en ville par rapport aux zones rurales
Température (moyenne annuelle)	0.5 à 3°C en plus
Rayonnement solaire (total) sur un plan horizontal au niveau des toits	0-20% en moins
Vitesse du vent (moyenne annuelle) au niveau des toits	20-30% en moins
Humidité relative (moyenne annuelle)	6% en moins

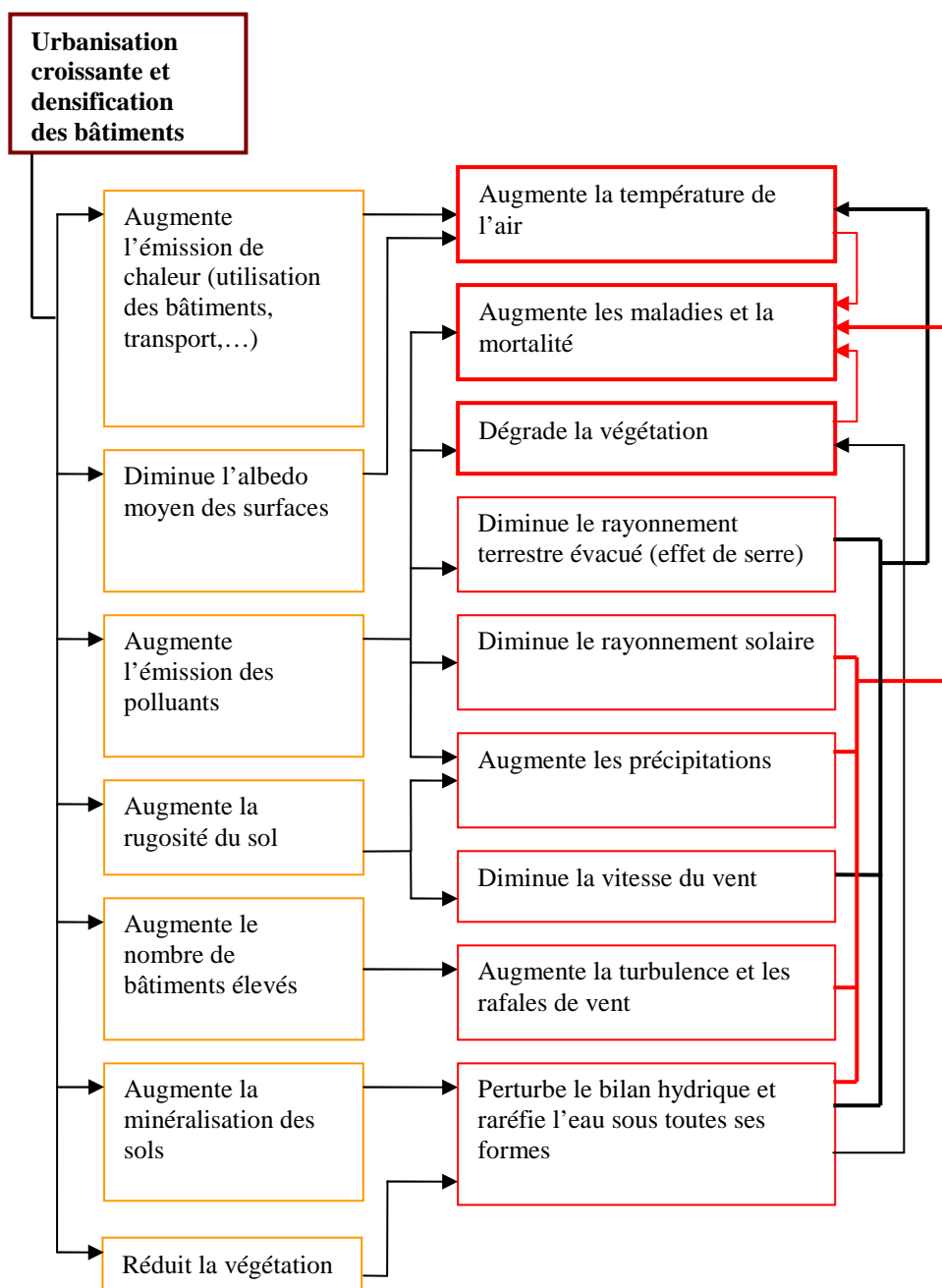
Cependant, les modifications les plus substantielles de microclimat urbain sont localisées au niveau des piétons. Les valeurs de réduction du rayonnement solaire total données par Landsberg correspondent à la réduction de la disponibilité du rayonnement solaire au niveau des toits ; il est toutefois évident que la réduction principale du rayonnement solaire en ville est provoquée par le degré d'obstruction dû aux bâtiments alentours.

Par ailleurs, au niveau des concentrations de polluants, les villes enregistrent des valeurs 5 à 25 fois plus élevées qu'à la campagne (Liébard & De Herde 1996).

Tout comme la vitesse moyenne du vent, la turbulence est modifiée par le tissu urbain. Par contre, contrairement à la vitesse moyenne du vent qui tend à être plus faible en zone urbaine, la turbulence et les effets de rafales de vent augmentent en ville par rapport à la campagne.

On peut aussi ajouter que la fréquence des brumes et brouillards augmente de 30% à 100% et que les hauteurs de précipitations augmentent de 5 à 10% (Merlin & Choay 1996). L'augmentation des jours de brouillard est due à la pollution et à la réduction de la vitesse du vent. Elle se manifeste sur les périphéries des grandes agglomérations. Dans le centre, en effet, l'îlot de chaleur tend à atténuer l'importance des brouillards.

Le dessin ci-dessous représente les facteurs qui entrent en jeu dans la formation d'un microclimat urbain ainsi que les conséquences négatives au niveau local d'une urbanisation du sol qui ne tient pas compte du microclimat.



Au niveau des enjeux globaux du développement durable, la volonté de densifier les zones urbaines a déjà été mise en évidence comme un élément positif pour l'environnement global de notre planète : réduction des consommations d'énergie grâce à la proximité des services et à la mitoyenneté, limitation de la quantité de pollution produite pour la planète, conservation du paysage naturel,... Il est toutefois évident que cela ne peut se faire sans tenir compte de la qualité de l'environnement local. La ville présente d'importants avantages au niveau global, mais par contre elle engendre de sérieux désagréments au niveau local: citons notamment la perte du contact à la nature, l'augmentation de la température pendant les périodes chaudes (rendues plus pénibles par la faiblesse des vents et la réduction de l'évaporation), l'augmentation de la pollution atmosphérique, etc.

Le climat urbain a des conséquences sur le confort et la santé des citoyens. Les troubles les plus graves de la santé sont observés lors de l'accentuation des fortes chaleurs et des grands froids. Les épisodes de forte pollution touchent avant tout les jeunes et les personnes âgées souffrant de troubles respiratoires (Escourrou 1991).

Les paramètres microclimatiques d'un site urbain peuvent donc présenter de substantielles modifications par rapport aux moyennes climatiques relevées aux stations météorologiques. **Le microclimat urbain suit une logique propre qui devrait enrichir tout projet urbain.**

Les paragraphes suivants décrivent en détail les différentes spécificités du microclimat urbain : la pollution de l'air en ville, l'effet d'îlot de chaleur urbain, la modification du rayonnement solaire en ville, la modification des mouvements d'air en milieu urbain et enfin la modification de l'humidité et des précipitations en ville.

3.2.1 La pollution urbaine

Les zones urbaines sont souvent les surfaces terrestres qui émettent le plus de polluants produits par l'homme et qui offrent les niveaux de concentrations de polluants les plus élevés. De plus, la pollution de l'air urbain est le facteur dominant dans l'exposition des êtres humains à la pollution. Vu que la plus grande partie de la population mondiale habite en ville, la qualité de l'air y devient un enjeu essentiel. La pollution de l'air affecte la santé des hommes et leur longévité, cause des dommages à la faune et la flore locale et cause une érosion excessive et une dégradation (habituellement par noircissement) des façades des bâtiments.

Lors de périodes de pollution intense, les admissions dans les services respiratoires des hôpitaux augmentent de 25 à 50% et les appels d'urgence pour crises d'asthmes se multiplient. A Bruxelles, l'Institut d'hygiène et d'Epidémiologie a publié un rapport liant le taux de pollution survenu en 1994 à une surmortalité importante : 1 226 décès supplémentaires par rapport à la moyenne prévisible.

Les problèmes de pollution de l'air en ville ne sont pas récents. Ils existaient déjà dans la Rome antique et ont pris une ampleur considérable depuis l'industrialisation de notre société. La photo ci-dessous montre une vue de Potteries (Stoke-on Trent) en Angleterre aux environs de 1910. Sur cette photo, la pollution est rendue visible par les fumées qui sortent des cheminées et qui vont former la pollution de fond de la ville à grande échelle. De nombreuses zones industrielles actuelles de par le monde ressemblent encore à cela. En Europe, actuellement, la plus grande différence est souvent qu'il n'y a plus de fumée et donc que le

processus de dispersion de la pollution n'est plus visible comme autrefois mais les émissions polluantes restent nombreuses.



Pollution de l'air (Littlefair & al. 2000)

Une partie de la pollution atmosphérique est créée au niveau des toits (anhydride sulfureux, poussières, oxyde de carbone, oxydes d'azote, composés organiques volatils): elle correspond aux émissions des cheminées d'habitations, des centrales thermiques, des usines. Du fait de la lutte contre la pollution industrielle, du développement de l'énergie atomique, de la baisse des chauffages individuels souvent mal contrôlés, les émissions d'anhydride sulfureux et d'oxydes d'azote ont fortement chuté dans les pays occidentaux depuis 1950. (Escourrou 1991)

Une autre partie de la pollution atmosphérique apparaît au niveau des rues. La source de pollution principale en est le trafic automobile. Les émissions polluantes dépendent de l'état des véhicules, de l'état des chaussées, du type de circulation (les émissions d'oxyde de carbone augmentent lors des démarrages et des ralentissements, celles d'oxydes d'azote lors de la vitesse accrue). Depuis le développement des essences sans plomb, les émissions de plomb diminuent. La circulation automobile engendre également des émissions de composés organiques volatils (particulièrement, de dérivés d'hydrocarbures). L'influence du climat sur ce type de pollution provoque des réactions chimiques (comme le brouillard photo-oxydant) et explique certaines pointes de pollution : les maxima se produisent à la périphérie des endroits de trafic intense, lors d'épisodes anticycloniques froids et sans vent. (Escourrou 1991)



(Liébard & al. 2004)



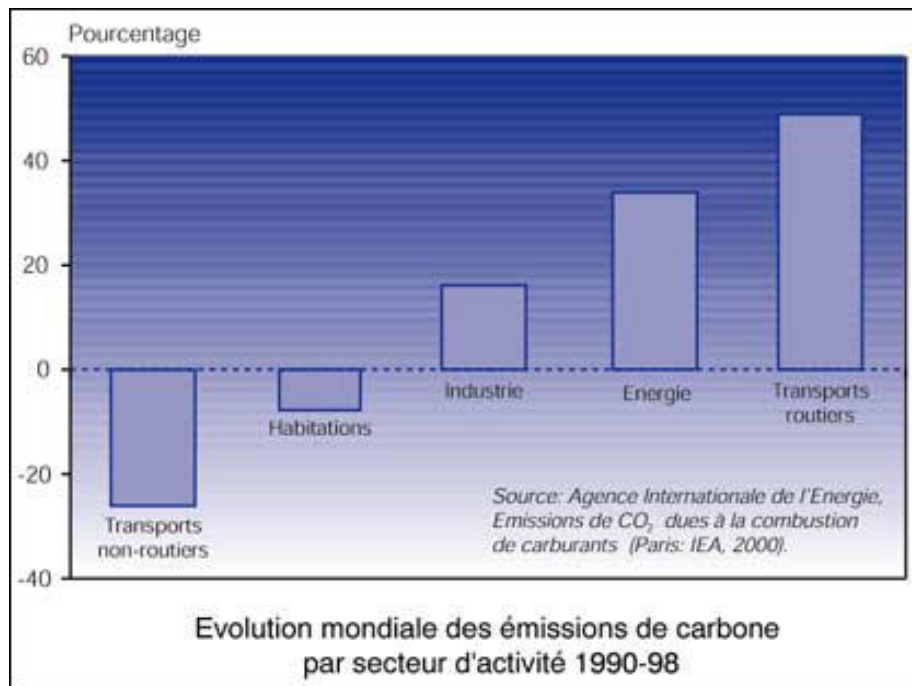
(Liébard & al. 2004).

Prenons Londres comme exemple : entre 1920 et 1950, les valeurs du rayonnement solaire d'hiver au niveau des toits de la ville avaient diminué de moitié par rapport à celles mesurées en dehors de la ville. La possibilité de profiter des gains solaires

et de la lumière naturelle en hiver était donc réduite de 50%. A Londres, en 1956, le Clean Air Act a été mis en place afin de limiter la pollution induite par les bâtiments et, en dix ans, les valeurs solaires d'hiver ont quasiment doublé, se rapprochant nettement des valeurs des alentours. Ces dernières années, la pollution de l'air à Londres s'est à nouveau fortement accrue à cause de l'augmentation importante du trafic automobile. Actuellement, des politiques de réduction de la voiture en ville y sont testées pour améliorer la qualité de l'air londonien.

Aujourd'hui, dans les villes européennes, l'utilisation de la voiture individuelle est souvent la source principale de la pollution de l'air. En dépit des réductions d'émissions des véhicules individuels, l'accroissement important du nombre de voitures en ville assure une augmentation constante de la pollution de l'air. A l'échelle de la rue, ce sont généralement les feux routiers, les tunnels et les parkings qui connaissent les plus fortes teneurs en oxydes de carbone (Escourrou 1991). A Bruxelles, par exemple, aux heures de pointe, la pollution présente des valeurs nettement trop élevées dans les tunnels par rapport aux critères énoncés par la World Health Organization (Santamouris & al. 2001). Les rues très étroites sont aussi des lieux d'accumulation des polluants émis au sol par les véhicules à moteurs et au niveau de la toiture par les cheminées industrielles et domestiques.

Le graphe ci-dessous synthétise les valeurs données par l'agence internationale de l'énergie (AIE) pour l'évolution mondiale des émissions de CO₂ dues à la combustion de carburants par secteur d'activité entre 1990 et 1998. Ce graphe montre que le transport routier est le secteur le plus critique du point de vue des émissions de CO₂.



Le tableau ci-dessous (CEE 1999) donne la comparaison des divers moyens de transport du point de vue écologique par rapport à la voiture individuelle pour un déplacement en personnes/ kilomètre identique. Dans ce tableau, deux voitures ont été prises en considération : une voiture avec catalyseur et sans catalyseur. Ce choix provient du fait que le pot catalytique n'est efficace que lorsque le moteur est chaud, ce qui signifie qu'on ne peut pas prendre en compte son effet bénéfique antipollution sur les petites distances parcourues en ville.

Moyen de transport	Voiture sans catalyseur	Voiture avec catalyseur	Bus	Vélo	Avion	Train
Consommation d'espace	100	100	10	8	1	6
Consommation d'énergie primaire	100	100	30	0	405	34
CO ₂	100	100	29	0	420	30
Oxyde d'azote	100	15	9	0	290	4
Hydrocarbures	100	15	9	0	140	2
CO	100	15	2	0	93	1
Pollution atmosphérique totale	100	15	9	0	250	3
Risque d'accident induit	100	100	9	2	12	3

(CEE 1999)

Les tendances actuelles de la mobilité en Belgique montrent également une croissance significative des déplacements motorisés individualisés. (STIB 2004)



Embouteillages aux heures de pointe à Bruxelles. (Photo : S. Rouche).

Le tableau ci-dessous provient d'enquêtes réalisées en Belgique. Il donne la répartition moyenne des déplacements sur une journée selon le mode de transport principal. (SFASTC 2001)

	Flandre	Bruxelles	Wallonie	Belgique
marche	13,5%	27,6%	15,9%	15,6%
deux-roues	12,9%	1,7%	2,9%	8,6%
transport public	4,7%	13,4%	5,2%	5,7%
voiture	67,9%	56,6%	74,5%	68,9%
autre	1,0%	,7%	1,5%	1,2%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

En Europe, 30% des trajets effectués en voiture couvrent des distances de moins de 3km et 50% sont inférieurs à 5 km : pour de telles distances, le vélo est plus rapide que la voiture en milieu urbain, même sans tenir compte des embouteillages aux

heures de pointe D'après la Commission européenne, un objectif de 14 à 17% de déplacements à vélo est réaliste. (CEE 1999)

Une bonne complémentarité entre le vélo et les transports publics doit être cherchée. On considère que la vitesse moyenne d'un piéton est de 5 km/h et d'un cycliste de 20 km/h, ce qui donne 0.9 km de distance parcourue en 10 minutes pour un trajet à pied et 3.2 km parcouru en 10 minutes pour un trajet à vélo.

A l'échelle du bâtiment, dans un immeuble de bureaux, la consommation journalière de 12 m² occupés par une personne correspond, en moyenne, à un parcours en voiture de 15 km. La consommation liée au transport des occupants du bâtiment est donc souvent plus élevée que la consommation du bâtiment lui-même ! Il est donc utile de veiller à limiter les déplacements des personnes qui seront amenées à utiliser chaque bâtiment, par exemple par l'implantation du bâtiment ou par le choix du traitement des emplacements de parking (Architecture et climat 2004).



(Architecture et Climat 2004)



(Photo : K. De Myttenaere)

L'explosion du parc automobile, au cours de ces dernières années, a signifié l'augmentation de la consommation d'énergie et des émissions toxiques pour la santé et l'environnement. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la pollution liée aux transports provoque chaque année 500 000 morts et 4 à 5 millions de nouveaux cas de bronchites chroniques.

Ceci dit, la pollution globale urbaine reste encore fort liée aux autres types d'émissions : pollution industrielle, systèmes de combustion (chauffage des bâtiments, centrales énergétiques et incinérateurs de déchets), ...

Le bâtiment est un secteur non négligeable dans la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre (GES) et ce, non seulement à cause de ce qu'il consomme en énergie (électricité et chauffage) en régime d'utilisation, mais aussi dès le processus de construction : plus de 10% des émissions de CO₂ et presque 20% de l'émission de dioxyde de soufre proviennent de la phase de construction du bâtiment (Liébard & al 2004). Ainsi, il est important de prendre en compte **le choix des matériaux de construction** pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les matériaux qui entreront dans le projet représenteront chacun un investissement énergétique spécifique en fonction de l'énergie nécessaire pour le produire, de sa localisation,.... On privilégiera donc le choix de matériaux de construction locaux et l'utilisation de matériaux recyclables ou recyclés,...

Un bâtiment écologique est souvent représenté comme une sympathique maison, économe en ressources et située en pleine nature, loin des concentrations urbaines et de leurs nuisances. Bien que cette image semble idéale, elle est trompeuse: en

effet, ce bâtiment aura besoin d'infrastructures et à prestations égales il nécessitera sensiblement plus d'énergie qu'un bâtiment banal implanté en ville (îlot de chaleur, mitoyens,...). Il est intéressant d'étudier la relation entre la forme d'un bâtiment et ses pertes de chaleur pour différentes typologies (appartement, semi-détaché, détaché, bungalow). La maison quatre façades dépense deux fois plus d'énergie par m² qu'un appartement dans un immeuble mitoyen.

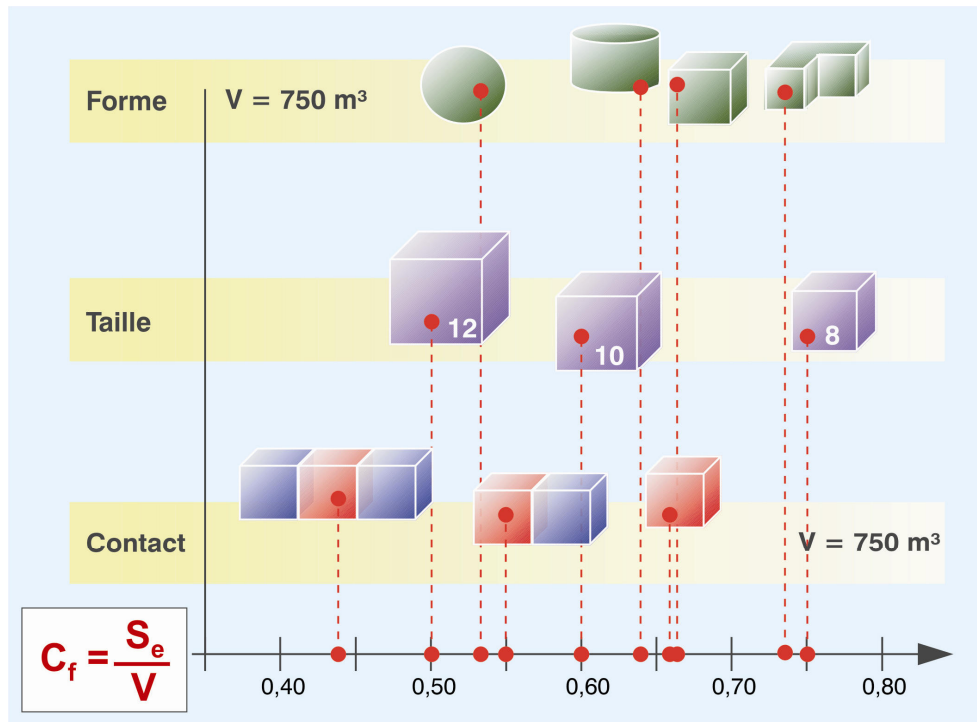
Le **coefficient de forme** d'un bâtiment mesure le rapport de la surface de l'enveloppe de déperdition au volume habitable (m²/m³). Il permet de qualifier les volumes construits en indiquant leur degré d'exposition aux conditions microclimatiques. Pour un même volume, les déperditions seront plus importantes à mesure qu'augmente la surface de l'enveloppe, dite surface de déperdition. Par conséquent, l'architecte doit chercher à minimiser la surface de déperdition tout en maximisant le volume intérieur, ce qui signifie réduire le coefficient de forme à son minimum. La compacité d'un bâtiment se définit par le rapport du volume habitable à la surface de déperdition de l'enveloppe, c'est-à-dire l'inverse du coefficient de forme. Donc, plus le coefficient de forme d'un bâtiment est faible, plus sa compacité (m³/m²) est élevée. Il s'agit évidemment d'augmenter la compacité d'un bâtiment pour limiter les consommations d'énergie et les émissions polluantes associées.

Si on se contente d'étudier l'influence de la forme sur la compacité, c'est la sphère qui apparaît comme la forme idéale. L'intérêt des formes sphériques a largement suscité l'imagination des architectes dans les années 70 : dômes, demi-sphères, structures polygonales complexes, visant toutes à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe. L'architecture vernaculaire, elle aussi, a toujours cherché à optimiser le rapport surface / volume, notamment par le travail de la toiture (à brisis, à deux ou quatre pans, etc.).



(Gratia & De Herde 2002)

Mais la compacité d'un bâtiment est un critère d'évaluation thermique complexe qui dépend non seulement de la forme volumique de l'édifice mais aussi de sa taille et des contacts qu'il entretient avec les bâtiments voisins. Le graphe ci-dessous classifie les coefficients de forme des bâtiments en fonction de la forme (à volume constant), de la taille (à forme constante) et du mode de contact entre bâtiments (à forme et volume constants).



Le coefficient de forme d'un bâtiment (Gratia & De Herde 2002)

Ce graphe permet de tirer la conclusion que le mode de contact entre volumes détermine de manière décisive leur compacité globale. Pour le même volume, le coefficient de forme d'une maison mitoyenne est inférieur à celui d'un bâtiment isolé car les deux murs mitoyens sont disposés entre deux espaces chauffés et ne doivent donc plus être comptés dans la surface de déperdition. Ainsi, la compacité d'une maison mitoyenne est encore supérieure à la compacité de la sphère. C'est pourquoi, la législation de nombreux pays encourage certaines typologies urbaines (rangées de maisons mitoyennes, immeubles collectifs) en abaissant les niveaux d'isolation globaux requis si la compacité du bâtiment est supérieure à un niveau de référence. Ainsi, tout bâtiment écologique devrait être partie prenante d'un habitat relativement dense.

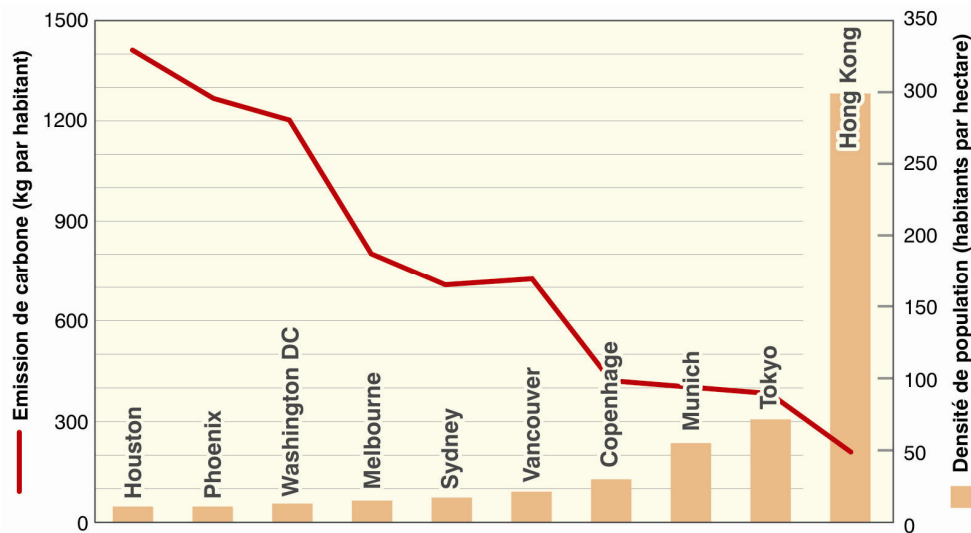
D'autres facteurs influencent les consommations d'énergie des bâtiments, tels que leur isolation, leur étanchéité à l'air, les obstacles environnants modifiant les conditions d'ensoleillement et de vent,...

A l'échelle de la ville, la dimension des îlots urbains et la dimension des voies jouent un rôle majeur dans l'efficacité énergétique des bâtiments qui les constituent. Il est donc judicieux de profiter de la compacité urbaine tout en créant des espaces publics urbains qui offrent un microclimat adéquat pour profiter des gains solaires, utiliser la ventilation naturelle, jouir d'un bon éclairage naturel,...

Pour des bâtiments très fortement isolés, l'impact du critère de compacité sur leur consommation est réduit mais la densité construite reste très importante de par ses implications sur la mobilité en milieu urbain.

La morphologie urbaine et son exploitation sont des critères importants dans l'évaluation des émissions polluantes en milieu urbain car ils influencent non seulement les consommations d'énergie des bâtiments (mitoyens,...) mais aussi celles dues au transport (opportunité d'utiliser des moyens de transport en commun, proximité des activités autour du domicile, ...). Ainsi, différentes études

ont porté sur le rapport entre la densité de la population urbaine et les émissions de CO₂ dues au transport routier. Elles arrivent toutes à la même conclusion que la **densité d'une ville** est un facteur important de la réduction des consommations d'énergie. Ces études montrent aussi que la diminution des dépenses d'énergie par habitant grâce à l'augmentation de la densité est très rentable pour une densité équivalente aux centres urbains européens traditionnels mais qu'elle devient minime pour des densités telles que celles de Hong Kong qui créent par ailleurs de nombreux désagréments locaux et vraisemblablement des surconsommations au niveau des bâtiments.

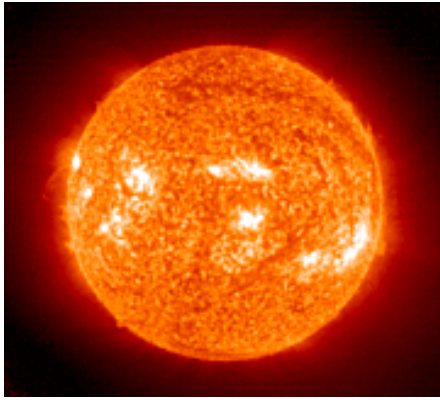


Rapport entre la densité de la population et les émissions de carbone dues aux transports en 1990 (Kenworthy et al. 1999).

On peut donc conclure que la densité des villes et l'efficacité de la distribution de son transport public sont des critères déterminants pour les consommations de CO₂.

Notons aussi que l'utilisation des **sources d'énergie renouvelable** permettrait de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluantes. Toute combustion génère des fumées qui contiennent certaines substances nocives pour l'environnement, toxiques pour l'homme et nuisibles pour les matériaux de construction. Quoi qu'il en soit, il est indispensable d'arriver à une réduction de l'émission de ces substances dangereuses, ce qui peut être réalisé en partie par une utilisation rationnelle de l'énergie. Si la priorité est donnée à l'efficacité énergétique des bâtiments, à la réduction du trafic automobile individuel et à l'utilisation maximale des énergies renouvelables, les émissions de polluants pourraient être réduites à temps afin d'éviter une catastrophe mondiale.

Parmi les énergies alternatives, le nucléaire n'est pas considéré par le développement durable à cause des risques énormes liés à une erreur humaine toujours possible et aux déchets produits. En outre, doubler le nombre mondial de centrales, un investissement immense, ne diminuerait que de 3% l'émission de CO₂. Les sources d'énergies étudiées sont donc l'hydraulique, l'éolien, le solaire, la géothermie et la biomasse (bois, biogaz, déchets de l'agriculture). En Europe, 6% de la production d'énergie provient de ces énergies renouvelables. En fait, sur les bases des conditions techniques et économiques actuelles, ces énergies pourraient contribuer pour environ 40% de la consommation énergétique mondiale. (Liébard & De Herde 1996)



(Photo : Greenpeace)



(Photos : S. Rouche.)

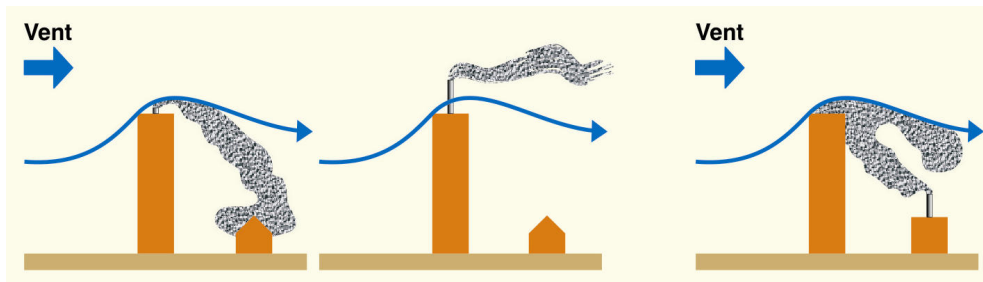
La pollution atmosphérique en ville dépend de facteurs météorologiques (la vitesse du vent, sa direction, la stratification de l'atmosphère) ainsi que des effets de la topographie locale et des obstacles locaux (densité construite, morphologie bâtie, variabilité des formes, hauteur et largeur).

Les vents faibles favorisent la formation de brume et de brouillard. Sous de telles conditions, les polluants ne sont pas entraînés ni dispersés, la pollution peut donc atteindre des valeurs particulièrement élevées au voisinage des sources. Ce fut le cas, par exemple, dans la vallée de la Meuse en décembre 1930 : on compta une soixantaine de décès dus à la pollution et de nombreux accidents pulmonaires graves. (Defrise 1973)

Les vents les plus polluants sont généralement les vents dont la vitesse est faible (Escourrou 1995). En Belgique, il est important de noter l'absence de corrélation nette entre la direction des vents dominants et la localisation du maximum de pollution provoquée par une source. Ceci est dû au fait que le vent provenant du secteur Sud-Ouest est le plus fréquent en Belgique mais qu'il s'agit d'un vent turbulent dont la vitesse moyenne est de 4m/s. Malheureusement, en Belgique, la rose des vents est très homogène lorsqu'on se concentre sur les vents de faible vitesse. On ne peut donc pas en tirer une règle précise pour l'implantation des sources de pollution par rapport aux agglomérations. (Godart 1971)

Les choix urbanistiques de base influencent fortement la capacité des villes à disperser la pollution produite. Certaines villes, comme Mexico ou Athènes sont célèbres pour leurs taux de pollution : encaissées dans une dépression, à l'écart des grands vents, tous les sous-produits de l'activité humaine s'y accumulent en quantités dangereuses sous forme solide, liquide et gazeuse. Les enjeux liés à la santé et au confort des citoyens y deviennent aigus.

Des petites cheminées sur un bâtiment élevé peuvent causer des zones de pollution intense dans le sillage à faible vitesse d'air qui prolonge le bâtiment. Par contre, si la cheminée est conçue suffisamment haute pour pénétrer dans la zone de séparation de l'air, la pollution locale est minimisée. Un autre problème peut apparaître au niveau des cheminées d'un bâtiment de petite hauteur situé à proximité d'un édifice nettement plus élevé : la fumée peut être redirigée vers le sol ou bien être envoyée vers le toit du bâtiment élevé, là où les bouches de ventilation sont généralement installées. Il est donc nécessaire dans ce cas de créer une cheminée spécialement élevée ou bien de placer le petit bâtiment à une distance suffisante du bâtiment élevé. Les schémas ci-dessous expliquent ces risques liés à l'influence du vent sur la propagation de la pollution.



(Bottema 1999)

Pour que l'augmentation des concentrations de polluants au niveau du sol due à la présence d'un bâtiment élevé soit inférieure à 30%, il faut respecter les règles suivantes (Bottema 1999 d'après EPA 1985):

1/ le sommet de la cheminée du bâtiment élevé doit atteindre au moins la hauteur suivante :

Hauteur de cheminée minimale = $H + 1.5 \min(W, H)$

où $\min(W, H)$ signifie la valeur la plus faible entre la hauteur et la largeur du bâtiment élevé

2/ cette hauteur de cheminée minimale doit être appliquée autour du bâtiment élevé dans un rayon égal à cinq fois la valeur la plus faible entre la hauteur et la largeur du bâtiment ($\min(W, H)$).

La morphologie du tissu urbain, sa mixité et la géométrie du bâti influencent la dispersion des polluants. La hauteur, l'espacement des bâtiments et leurs orientations déterminent la structure des mouvements d'air qui pourront disperser les polluants ou au contraire les concentrer au niveau des espaces publics. L'affection des bâtiments, des activités et l'organisation des circulations (routes, parkings, transports en commun) influencent l'intensité du trafic. Par exemple une zone d'activité mixte (habitat, travail) permet une diminution de la circulation pendulaire et une meilleure utilisation des infrastructures et de l'énergie, ce qui a pour conséquence de diminuer la pollution produite localement. La géométrie de l'enveloppe des bâtiments conditionne les échanges thermiques des bâtiments et donc leurs consommations d'énergie ainsi que la pollution qu'ils engendrent.

La ville compacte qui est le meilleur modèle urbain pour limiter les émissions de CO_2 crée malheureusement la dispersion la plus faible du point de vue de la pollution à grande distance (Manins & al. 1998); elle nécessite donc d'autant plus de contrôle des émissions polluantes.

La pollution locale d'un lieu est toujours la somme de la concentration très homogène qui vient de loin et des polluants produits dans un rayon proche du lieu considéré. Les concentrations de pollution peuvent varier fortement localement dans le tissu urbain car elles dépendent fortement des mouvements d'air qui sont stationnaires et qui sont fortement affectés par les bâtiments et la topographie.

Les paramètres urbanistiques influencent la dispersion des polluants émis sur une hauteur allant du sol à 2 ou 3 fois la hauteur des bâtiments, ce qui correspond à la majorité des émissions locales, à l'exception des très hautes cheminées industrielles. Par contre, la conception à petite échelle de la forme urbaine a peu d'influence sur la pollution qui est générée à une distance de plus de 1km.

La pollution produite localement doit être ventilée le plus rapidement possible pour éviter des fortes concentrations locales. La forme urbaine influence la dispersion des polluants par son influence sur la vitesse de l'air en milieu urbain, car les concentrations de polluants sont inversement proportionnelles à la vitesse de l'air, et par son influence sur la turbulence de l'air qui peut maximiser localement la vitesse de dispersion des polluants.

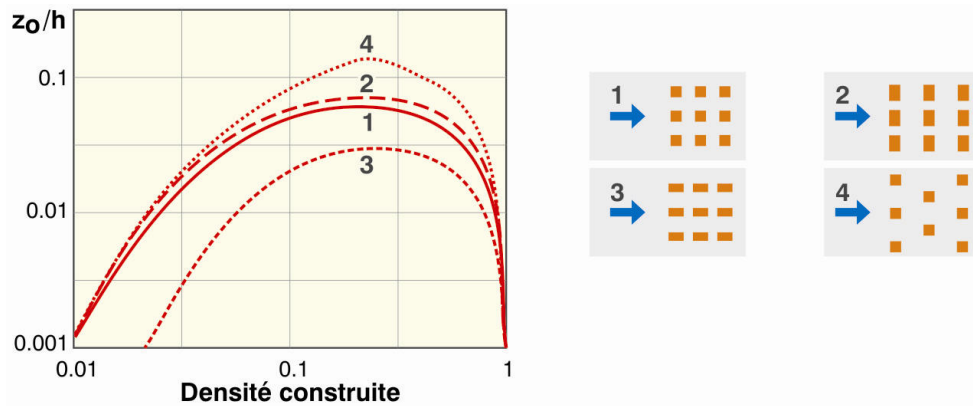
La géométrie urbaine affecte la capacité de la ville à disperser les polluants produits au niveau de la rue et des toitures car :

- la rugosité de surface de la ville affecte la turbulence mécanique produite et la forme du profil de vent vertical. La rugosité du milieu urbain dépend à la fois de sa densité et du type de groupement des bâtiments.
- la géométrie des rues détermine la profondeur de la zone de dispersion des polluants. Il s'agit non seulement de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur espacement mais aussi de l'orientation des rues principales par rapport aux vents dominants.
- l'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain. La hauteur et la largeur au vent des bâtiments qui sont supérieurs à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments influencent la dispersion des polluants autour de ceux-ci.
- l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

La densité urbaine est la surface construite divisée par la surface totale de la zone considérée. Plus la longueur de rugosité est grande, au plus l'intensité de turbulence est importante et au plus la profondeur de la zone de dispersion est grande. Pour des éléments identiques, la longueur de rugosité augmente avec l'accroissement de la hauteur des éléments et de leur densité jusqu'à un point critique, à partir duquel la rugosité diminue à cause de l'effet de masque urbain. La longueur de rugosité relative Z_0/h (où h est la hauteur moyenne des éléments) augmente avec la densité des éléments jusqu'à une pointe qui vaut typiquement 0.2 – 0.3 et se produit pour des densités d'environ 0.25, allant de 0.13 à 0.32 (Oke 1988). Bottema confirme ce résultat en montrant que la ventilation maximale espérée en liaison avec la rugosité du sol correspond en général à une densité construite d'environ 20-25%. (Bottema 1993)

Pour Littlefair & al, la densité urbaine influence seulement très légèrement la dispersion des polluants par l'intermédiaire du paramètre de rugosité du sol mais elle modifie fortement la vitesse de l'air dans les espaces publics et agit par cet effet sur la dispersion des polluants (Littlefair & al. 2000).

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la rugosité d'une urbanisation en fonction de l'augmentation de sa densité construite et du type de blocs construits. Les groupes de bâtiments avec une configuration en quinconce sont plus favorables à la dispersion des polluants qu'un quadrillage normal car ils présentent une rugosité supérieure à ce dernier. Des bâtiments implantés dans le sens du vent, rendent l'écoulement plus facile et diminuent donc la rugosité, même s'ils augmentent la vitesse de l'air et qu'ils sont donc préférables du point de vue de la ventilation que les bâtiments placés perpendiculairement au vent. Dans tous les cas, la rugosité maximale se produit pour une fraction construite d'environ 20% mais le maximum est relativement plat sur une large bande de densité urbaine (Bottema 1993).



(Bottema 1993)

La manière dont les bâtiments sont disposés les uns par rapport aux autres (en lignes, en îlots, répartis uniformément,...) influence fortement l'écoulement du vent et donc ses effets aérodynamiques qui sont prépondérants sur les concentrations de polluants. La largeur des bâtiments ou groupes de bâtiments a une influence maximale pour une densité urbaine de 20%. De manière générale, on peut dire que la dispersion des polluants est maximale quand les bâtiments sont relativement larges et bas, avec une densité basse à modérée. (Littlefair & al. 2000)

Oke décrit le développement de trois régimes de vent différents le long d'une rue délimitée par des bâtiments de même taille et forme, quand le vent est perpendiculaire à la rue. Ces régimes dépendent du rapport entre hauteur de bâtiments et largeur de la rue, H/W , avec un effet de séparation quand $H/W > 0.65$, un effet d'interférence quand H/w est compris entre 0.33 et 0.65, et un flux isolé quand $H/W < 0.33$. (Oke 1987)

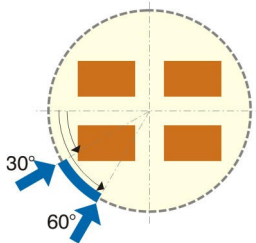
Pour des rapports H/W faible, la dispersion est bonne et elle est reliée directement à la vitesse du vent. Pour un rapport H/W compris entre 0.33 et 0.65, bien qu'il puisse y avoir des poches de pollution locales, globalement il y a un bon mélange d'air entre l'air de la rue et l'air propre de la couche limite au-dessus des toits. Ce mélange d'air est fortement réduit dès que la géométrie induit un flux d'air séparé c'est-à-dire pour un rapport $H/W > 0.65$. (Oke 1988)

Dans les rues très profondes (H/W élevé), deux boucles d'air se superposent et la dispersion des polluants due au vent est ineffective. Cette géométrie risque de créer de graves problèmes de pollution de l'air dans nos villes où les transports automobiles sont très fréquents, vu que pour ce type de géométrie la diffusion des polluants n'est possible que par effet thermique (différence de température).

De Pauw, Shieh, Nakamura, Oke, Mc Cormick, Yamartino et Wiegand, qui ont tous travaillé avec un rapport H/W entre 1 et 1.5, obtiennent des valeurs proches de 2m/s comme limite de la vitesse du vent au-dessus des toits pour créer une circulation qui en dépende. Dans ce cas, le mouvement d'air créé au niveau du sol est dans le sens inverse du sens du vent au-dessus des toits. Pour des vitesses de vent inférieures, les effets thermiques et mécaniques deviennent prépondérants. (Santamouris & al. 2001) Les données météorologiques de la Belgique associées à un profil de vent urbain nous donnent une vitesse moyenne sur l'année de 2m/s mais ce flux d'air n'est pas assuré à tout moment et les débits de polluants pouvant être éliminés ne sont pas encore déterminés.

Il serait nécessaire d'étudier de manière approfondie les débits de dispersion des polluants en fonction du vent et des effets thermiques pour différentes morphologies construites. Les bâtiments peuvent être regroupés en îlots géométriques formant de longues rues bien définies ou en un tissu moins ordonné (comme les centres médiévaux par exemple). Mais le comportement aérodynamique d'une zone urbaine dépend autant de son orientation que de sa forme car une géométrie très orthogonale présente de larges ouvertures sous certaines orientations mais bloque le vent dans les autres directions.

En milieu urbain, la dispersion des polluants est maximale pour une orientation du vent allant de 30° à 60° par rapport à l'axe des rues principales. Dans le cas, d'un vent parallèle à l'axe de la rue, les polluants sont propagés le long de la rue dans un premier temps avant d'être dispersés. L'orientation la plus critique est bien sûr celle où le vent est perpendiculaire au canyon, ce qui limite les possibilités de ventilation de la rue. Il est donc idéal de placer les rues importantes et très polluées sous un angle de 30 à 60° par rapport au vent dominant. Ainsi, en Belgique, où le vent dominant vient du SO, les rues orientées est-ouest sont idéales pour la dispersion des polluants en milieu urbain.



En conclusion, une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.65$ associé avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30 à 60° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

Certaines zones urbaines présentent des bâtiments de hauteur relativement homogène, tandis que d'autres proposent de larges variations de hauteur. Cette différence est d'autant plus importante que la densité urbaine est élevée (> 20%). En effet, de fortes variations de hauteur encouragent la pénétration de mouvements d'air à plus grande vitesse au niveau du sol urbain. Cette variation de hauteur semble avoir peu d'effet sur la vitesse de dispersion des polluants due à la turbulence de l'air par contre elle augmente fortement la vitesse moyenne de l'air au niveau du sol et donc réduit les concentrations de polluants grâce à cet effet.

L'amélioration de la ventilation naturelle et de la dispersion des polluants due à une plus grande variabilité de la hauteur du bâti peut même favoriser une zone de densité supérieure à un quartier de taille homogène dont la densité est plus faible. (Santamouris & Asimakopoulos 1996).

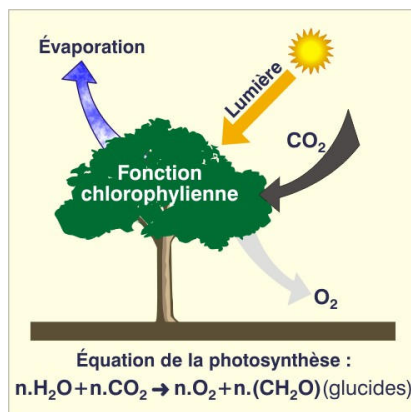
Ainsi, la présence d'un petit nombre de bâtiments plus élevés que la moyenne, répartis à travers des îlots de bâtiments homogènes, sont capables d'améliorer l'échange d'air entre la rue et la couche au-dessus des toits, favorisant une bonne qualité de l'air dans les rues au niveau piéton. Pour des bâtiments isolés ou nettement plus élevés que la hauteur moyenne, la dispersion des polluants augmente avec leur largeur et avec leur hauteur. L'augmentation de la largeur des bâtiments n'a toutefois une influence que jusqu'à huit fois sa hauteur. Si le bâtiment est encore plus large, cela n'a plus d'influence sur la dispersion des

polluants. Dans le cas de bâtiments élevés, il faut toutefois faire attention au confort au vent au niveau des piétons.

Nous proposons donc de créer des variations moyennes de la hauteur du bâti, comme par exemple surélever les coins d'une rue d'une hauteur égale à 1.5 ou 2 fois la hauteur moyenne des bâtiments, ce qui est très bon pour la ventilation et la dispersion des polluants, sans générer de problèmes pour le confort au vent des piétons. De plus, cela apporte de la diversité dans la ville, créant des rythmes et la possibilité de repères visuels tout en évitant des inconforts excessifs.

D'autres éléments morphologiques plus spécifiques pourraient être étudiés du point de vue de leur impact sur la pollution urbaine. Par exemple, lorsque les toits sont en pignon, l'intensité de turbulence est plus grande que pour des toits plats. D'autre part, dans les cours et intérieurs d'îlots, il est essentiel de minimiser au maximum la pollution produite car les polluants générés auront beaucoup de mal à être évacués.

Signalons que la **végétation** peut aussi aider à remédier au problème critique de la pollution de nos agglomérations. Les arbres ont un effet d'oxygénation sur leur entourage et ils sont capables de filtrer les poussières en suspension. La végétation absorbe également l'ozone, le dioxyde de soufre et d'autres polluants, réduisant leur concentration dans l'atmosphère. Les plantes survivent par un échange de lumière, d'eau et de gaz. Dans les zones où la qualité de l'air est pauvre, beaucoup d'espèces de végétation peuvent absorber des niveaux substantiels de polluants urbains courants. Les arbres à feuille caduque présentent l'avantage supplémentaire de renouveler leurs feuilles chaque année ce qui permet un meilleur filtrage de l'air.



Ainsi, les arbres plantés dans une rue améliorent la qualité de l'air de cette rue. Il est donc évident que les espaces verts devraient être répartis de manière équilibrée dans tous les quartiers plutôt que regroupés en quelques grandes zones. Il est également utile de placer des arbres près (ou sous le vent) des sources de pollution telles que les autoroutes, les carrefours à grand trafic,...



(Photo : S. Reiter).

Des zones vertes de grande taille peuvent générer des courants d'air thermiques entre leurs surfaces végétales et les zones urbanisées. Ces mouvements d'air participent à la diminution de la pollution urbaine.

Des sources de pollution situées à différentes distances du site étudié donneront des schémas d'exposition différents.

- Le champ de pollution éloigné correspond à des sources polluantes situées au-delà de 1km de distance ; sa répartition ne dépend plus des bâtiments et des structures individuelles mais uniquement de la turbulence atmosphérique.
- Le champ intermédiaire correspond à une distance de quelques centaines de mètres à environ 1 km ; les émissions polluantes s'étendent au-delà de quelques bâtiments et structures. La dispersion de ses polluants dépend de la densité construite (proportion de la surface au sol bâtie), de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur largeur ainsi que de leur variabilité dans la zone environnante.
- Le champ de proximité correspond à des émissions polluantes qui restent localisées et s'étendent seulement jusqu'à quelques centaines de mètres.

Du point de vue de l'architecte, il est souvent impossible d'éviter le champ de pollution éloigné. Par contre, il est davantage possible de contrôler ou d'éviter les nuisances dues à des sources locales. La conception architecturale et urbanistique permet de réduire les effets du champ de pollution de proximité, surtout quand les données météorologiques locales sont prises en compte.

Evaluer la pollution en zone urbaine

La prédiction des niveaux de polluants en zone urbaine est importante car ce sont souvent dans les zones urbaines que se trouvent les plus hautes densités de sources d'émissions polluantes et donc de concentration de polluants dans l'air. Ces prédictions peuvent être faites pour évaluer des situations existantes, pour choisir l'emplacement d'une nouvelle source polluante (une industrie, par exemple) ou pour étudier l'influence des constructions et de la distribution du réseau routier sur la pollution urbaine.

De nombreuses villes européennes possèdent des stations de mesures de la pollution urbaine. Pour Bruxelles, les valeurs de concentrations de nombreux polluants sont mesurées en permanence par l'IBGE : le dioxyde de soufre, le monoxyde d'azote, le dioxyde d'azote, l'ozone, la teneur en plomb, BTX (benzène, toluène et xylènes) et HPA, ainsi que les particules en suspension. Ces mesures sont représentatives à l'échelle d'une zone urbaine. Cependant, ces monitorings ne permettent généralement pas d'évaluer la contribution d'une source de pollution spécifique sur la distribution locale des niveaux de pollution ni de tester les modifications locales à apporter pour améliorer la situation en jeu. En revanche, pour prédire les niveaux de pollution locaux, on peut utiliser des modèles de dispersion des polluants. Il existe trois sortes de modèles qui correspondent à l'échelle d'étude envisagée (Littlefair & al. 2000) :

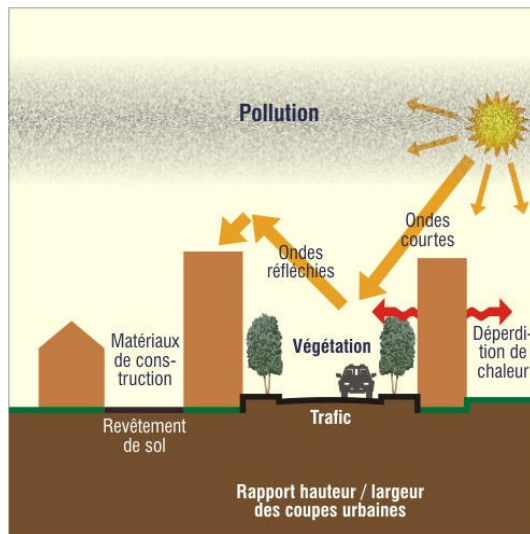
- le champ éloigné : des modèles récents tels que UKADMS par exemple fournissent une correction complète (verticalement et latéralement) des effets de la rugosité du sol sur la dispersion des polluants.
- le champ intermédiaire : à ce niveau, des recherches précises sur l'impact d'ensembles d'îlots urbains sur la dispersion des polluants sont encore

nécessaires pour améliorer les modèles de dispersion de Gauss conventionnels.

- le champ local : la dispersion des polluants au niveau local engendre des champs de concentration variable qui sont très difficiles à modéliser avec un grand degré de précision. Ce type d'étude nécessite en général l'utilisation de tests en tunnel à vent ou parfois de simulations CFD bien que dans ce cas elles restent relativement imprécises. En effet, la recirculation de l'air au niveau des rues est instationnaire, avec des fluctuations pouvant aller jusqu'à plus de deux fois la moyenne stationnaire qui reste souvent faible. Il est donc important de tenir compte de cet aspect instationnaire pour l'évacuation des polluants, ce qui complique très fortement son application par des méthodes CFD. Signalons également des règles simplifiées valables en première approximation qui sont données dans le chapitre 12 du ASHRAE handbook of Fundamentals. (ASHRAE 2001).

3.2.2 L'effet d'îlot de chaleur urbain

L'effet d'îlot de chaleur urbain représente la hausse de la température de l'air en milieu urbain par rapport à la température de l'air mesurée simultanément en site dégagé. Le schéma ci-dessous représente les paramètres qui influencent la température urbaine et donc l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.



La densification des urbanisations modifie les conditions du bilan radiatif des villes par rapport à leur environnement, favorisant l'effet d'îlot de chaleur urbain. Dans les villes :

- les bâtiments et les surfaces couvertes d'un matériau de revêtement s'échauffent assez fortement à la réception de la radiation solaire,
- les radiations d'ondes longues émises par les surfaces ont des trajets complexes ; elles sont renvoyées de surface en surface, si bien que, dans l'ensemble, elles sont en quelque sorte « prisonnières » de la ville, ce qui réduit les pertes radiatives de celle-ci ;
- l'atmosphère des villes étant en général polluée, les poussières en suspension réduisent la quantité de la radiation entrante, mais aussi celle de la radiation sortante : ce dernier effet tend à prédominer sur le premier, si bien que, dans les villes, « l'effet de serre » est augmenté.

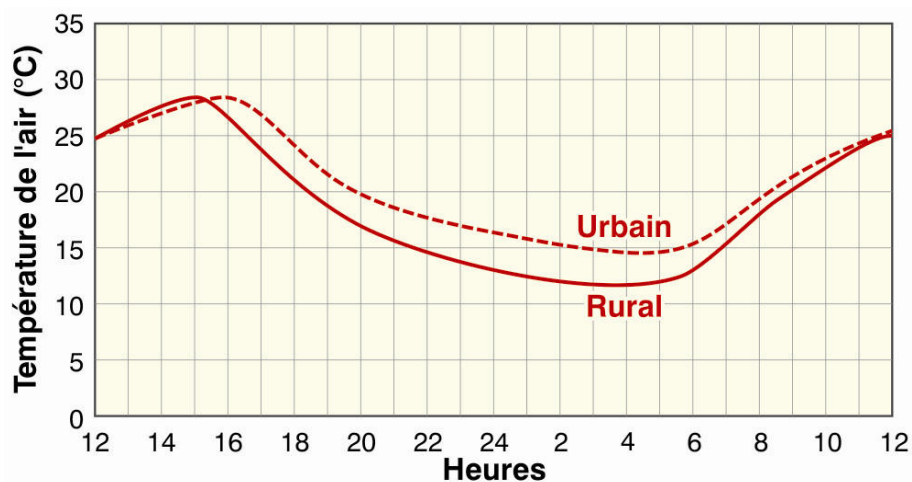
L'îlot de chaleur urbain est renforcé par la production de chaleur due aux activités humaines (chauffage des immeubles en hiver,...). L'utilisation des bâtiments (chauffage, éclairage,...) génère de la chaleur. La densité de trafic augmente cet effet. Un million d'habitants génère environ 100 MW de chaleur métabolique et les villes les plus larges du globe: 1 à 2 GW.

De plus, il y a généralement moins de refroidissement dû au vent et à l'évaporation en milieu urbain car la vitesse du vent y est réduite et qu'il y a en général moins de végétation et de plans d'eau en ville.

La quantification précise de l'effet d'îlot de chaleur est difficile à déterminer. Historiquement, la première étude scientifique qui prouve l'existence d'un îlot de chaleur urbain a été réalisée par Luke Howard en 1820 sur la ville de Londres. Il réalisa une analyse durant 10 ans de la température moyenne journalière et fournit la première constatation scientifique d'une variation à la fois saisonnière et journalière de la variation de température ville/campagne.

L'intensité de l'effet d'îlot de chaleur est généralement supérieur en été qu'en hiver, saison généralement plus venteuse et moins ensoleillée. Les différences de température moyenne annuelle entre une ville et la campagne sont généralement faibles : de l'ordre de 1 à 2°C. Cependant, dans certaines conditions climatiques, souvent par temps calme et ensoleillé, ces différences augmentent. Par ailleurs, les variations journalières et saisonnières peuvent être nettement plus importantes.

En général, l'environnement urbain est plus chaud juste avant le lever du soleil que les sites ruraux car la ville se refroidit plus lentement pendant la nuit. Après le lever du soleil, quand la rosée est évaporée, un site rural se réchauffe plus rapidement qu'un site urbain. Pendant la journée, les températures urbaines et rurales convergent et se croisent même lorsque les sources de chaleur internes à la ville ne sont pas trop importantes. Après le coucher du soleil, les surfaces se refroidissent rapidement à la campagne alors que la ville se refroidit plus lentement. A partir du moment où la rosée s'est formée sur les sites ruraux, leur refroidissement ralenti. La différence maximale de température se produit donc généralement la nuit, souvent quelques heures après le coucher du soleil. La figure ci-dessous reprend cette évolution habituelle de l'effet d'îlot de chaleur (basé sur Oke 1987).



(Schéma basé sur Oke 1987).

Toutefois ce schéma de déphasage temporel journalier n'est malheureusement pas applicable de manière universelle sur l'ensemble des agglomérations urbaines. De

nombreuses villes présentent des caractéristiques spécifiques quand à leur bilan thermique journalier, ceci étant dû à la multitude des facteurs qui contribuent à l'élaboration de la température de l'air en ville.

L'îlot de chaleur urbain dépend de l'orientation des bâtiments, leur hauteur, la densité construite, la proximité du centre ou de la périphérie de la ville et l'intensité des activités humaines qui s'y produisent. Ainsi les rues du centre ville subissent l'effet de l'îlot de chaleur de manière plus importante que la périphérie.

Cette hausse des températures de l'air varie également selon la densité d'espaces verts et la vitesse des vents, qui diminuent tous les deux la différence de température par rapport à un lieu dégagé. Plus le vent est fort, plus l'intensité de l'îlot de chaleur décroît. A partir des études de Oke et d'Escourrou, on peut dire de manière approximative que l'intensité de l'îlot de chaleur est double lorsque la vitesse moyenne du vent à 10m de haut à la station météorologique est de 1m/s par rapport à des conditions d'un vent de 5 m/s. Dans le cas d'un vent fort, la température dans l'agglomération urbaine tend vers la température de l'air à la station météorologique. A la périphérie d'une agglomération, les rues orientées dans la direction du vent dominant sont sujettes à une pénétration importante. Il est naturel qu'une ville placée dans une vallée protégée des vents a une plus grande différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la ville qu'une ville située sur un plateau exposé aux vents (Geiger 1980).

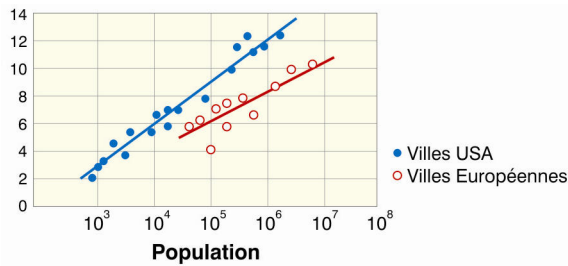
Dans « The Climate of London », Chandler montre que la température annuelle moyenne du centre de Londres est de 1.4°C supérieure à la campagne environnante. Les différences entre les températures moyennes mensuelles donnent un climat plus chaud de 1.6°C dans le centre de Londres en été et de 1.2°C en hiver. La moyenne annuelle des maxima journaliers de la température de l'air y est de 0.9°C supérieure. La différence entre les moyennes des maxima journaliers donne 1°C plus chaud en été et 0.7°C en hiver. Mais ces écarts sont également fluctuants. Ainsi, Chandler nous dit que pendant une journée d'été, le centre de Londres est plus chaud que la campagne pendant environ 60% du temps avec une différence de température qui varie entre 0.6°C et 2.2°C alors qu'il est plus froid que la campagne pendant environ 40% du temps avec une différence de température allant de 0 à 1.7°C. Il n'y a que pendant 1% du temps que la température urbaine en journée dépasse la température en plaine de 2.8 à 4.4°C.

Notons également la constatation de Rosenfeld réalisée pour des après-midi d'été ensoleillées : la température de l'air en ville est généralement supérieure de 2.5°C par rapport à la station météorologique (Rosenfeld 1995).

L'effet d'îlot de chaleur est en général maximal pendant la nuit, pour des conditions météorologiques sans vent et un ciel sans nuage. Pour Givoni, la différence de température moyenne nocturne pour les grandes villes atteint souvent 3 à 5°C de plus qu'à la campagne et peut même aller jusqu'à 8°C en plus dans les cas extrêmes. Il constate par contre une différence de température de seulement 1 à 2°C pendant les heures du jour et remarque que souvent la température maximale de jour est supérieure à la campagne par rapport à la ville (Givoni 1998).

L'îlot de chaleur nocturne est très dépendant de la densité de la population. Il résulte de l'apport d'énergie anthropique (chauffage, éclairage, ...) et du stockage de la chaleur solaire dans les matériaux de construction suivi de sa restitution lente. (Escourrou 1995). Oke a pu créer une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur de nuit et la taille de la population urbaine. Il a proposé deux

régressions différentes pour le nord de l'Amérique et pour les villes européennes (figure ci-dessous). L'intensité maximale de l'îlot de chaleur attendu pour une ville d'un million d'habitants est proche de 8°C en Europe et de 12°C aux USA.

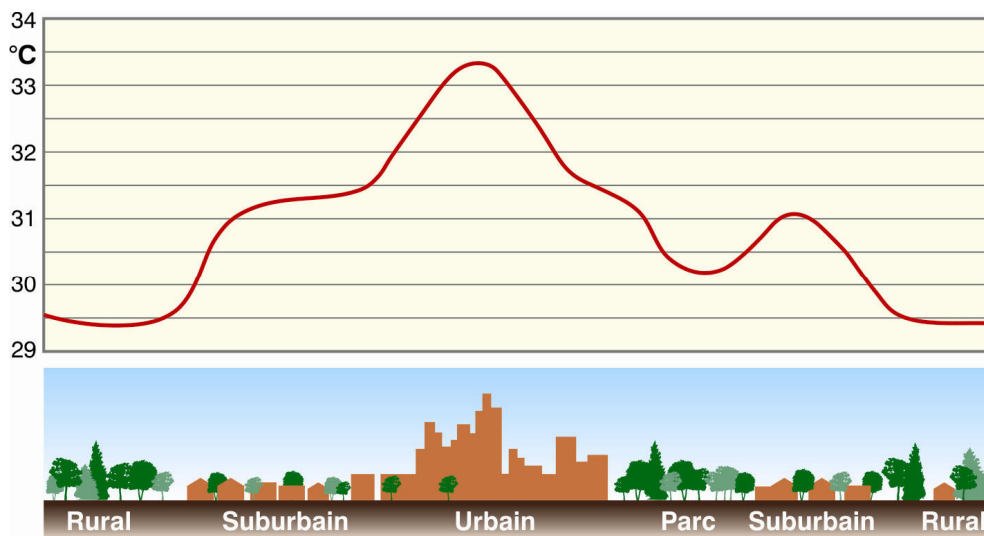


Intensité maximale de l'effet de chaleur en °C en fonction de la densité de population (Oke 1988).

Une étude de Jauregui a confirmé ces résultats. Il justifie la différence entre les comportements climatiques des villes d'Europe et des Etats-Unis par la morphologie différentes de nos villes (bâtiments moins élevés, densité moyenne,...).

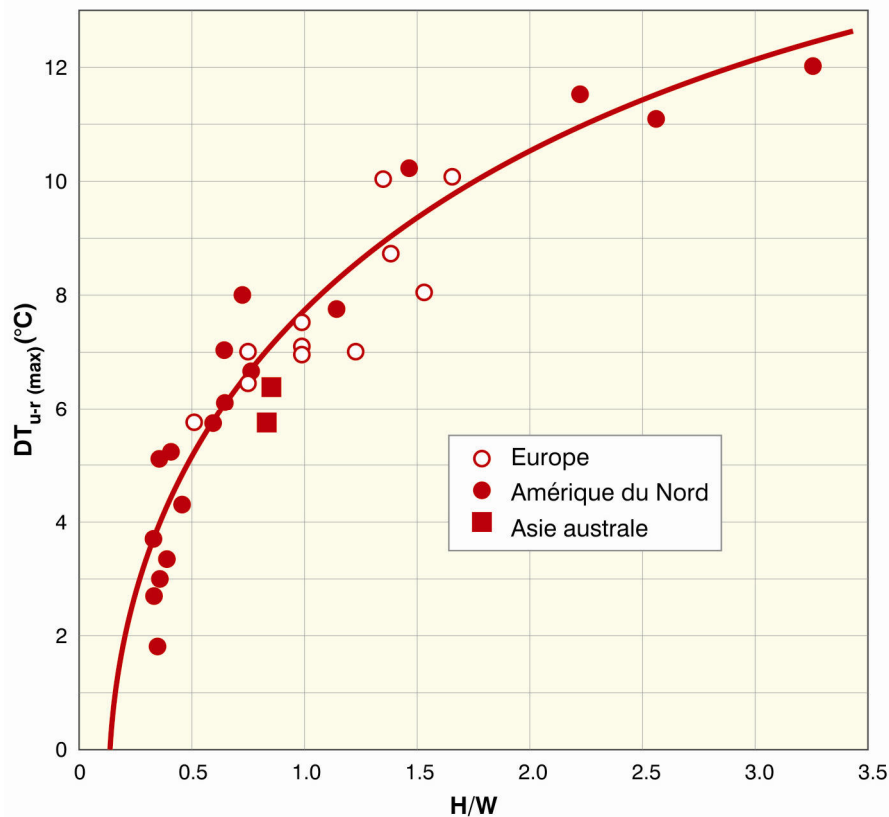
L'îlot de chaleur diurne est beaucoup plus irrégulier et plus faible en amplitude car il dépend également du rayonnement solaire qui est souvent plus faible en ville à cause de la pollution. L'îlot de chaleur urbain diurne existe toutefois dans la majorité des villes sauf dans le cas de quartiers de villes traditionnels méditerranéens où la pauvreté de la végétation à l'extérieur de la ville et la qualité d'un urbanisme construit pour créer un microclimat de fraîcheur inversent la tendance. (Escourrou 1995)

Un élément supplémentaire complexifie encore la question de l'îlot de chaleur urbain : cette différence de température entre la ville et la campagne varie spatialement au sein de l'urbanisation. Tout d'abord, la température est généralement plus élevée au centre de la ville et diminue vers la périphérie de l'urbanisation. Ensuite, des éléments d'aménagement locaux influencent la température d'un site spécifique comme la présence d'une zone végétale importante ou d'une grande surface d'eau (lac, ...). Le schéma ci-dessous montre comment la température de l'air varie en fonction de la nature du sol du centre d'une urbanisation vers sa périphérie, pour un jour ensoleillé en fin d'après-midi.



Il n'y a donc pas une différence de température entre la ville et la campagne mais plutôt un ensemble de microclimats différents à la fois spatialement et temporellement. C'est ce qui rend extrêmement difficile la quantification de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Vu la complexité du problème, peu de publications se risquent à donner des valeurs quantitatives précises.

Les espaces urbains qui ont un angle de vue du ciel étroit, c'est-à-dire un rapport entre la hauteur des bâtiments et leur espacement H/W élevé, se refroidissent plus lentement à cause de leur faible potentiel à perdre de la chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde vers la surface du ciel. Il a été démontré que cet effet est crucial dans l'augmentation de la température des espaces urbains, spécialement la nuit. Le graphe ci-dessous montre la relation empirique qui existe entre la géométrie des rues du centre-ville (H/W) et l'intensité maximale de l'effet d'îlot de chaleur (Oke 1988).



(Oke 1988).

En comparant 30 villes d'un million d'habitants situées à des latitudes moyennes, Oke a trouvé une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur et la géométrie du canyon urbain. Il a exprimé cette adéquation par une formule qui inclut le rapport H/W entre la hauteur des bâtiments (H) et leur distance de séparation (W): $dT_{max} = 7.54 + 3.97 \ln(H/W)$ (Oke 1988). On obtient donc une valeur maximale de l'effet de l'îlot de chaleur égale à 7.54°C pour un profil de rue dont la hauteur et la largeur sont de même longueur, de 4.79°C lorsque les rues sont deux fois plus larges que la hauteur des bâtiments et de 10.29°C lorsque le canyon est deux fois plus haut que large. Ce maximum correspond aux valeurs nocturnes maximales pour un ciel sans nuage et sans vent.

Cependant, lorsque le facteur de vue du ciel est très réduit, c'est-à-dire pour H/W élevé, l'ombrage de l'espace public est assuré plus longtemps. Une diminution de la température urbaine journalière peut alors se produire.

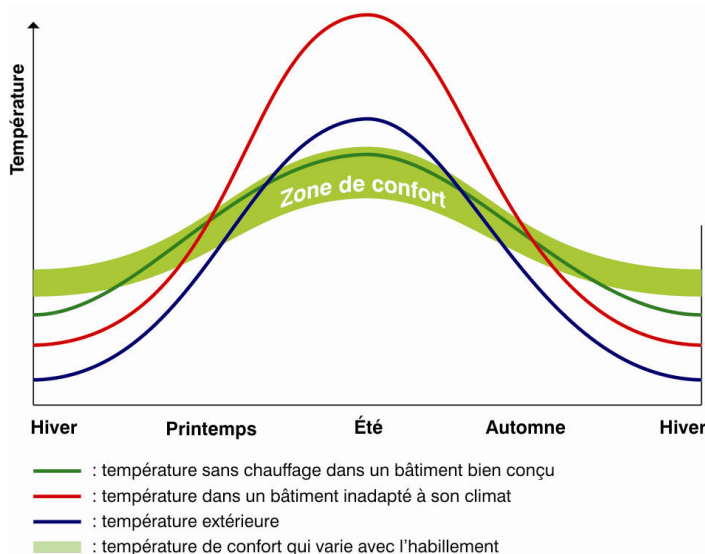
D'autre part, plus le facteur de vue du ciel est élevé ou le rapport H/W est faible, plus grande est la différence thermique entre la nuit et le jour ou entre l'été et l'hiver. Notons aussi que pour un rapport H/W inférieur à 0,4, l'effet d'îlot de chaleur annuel moyen est fortement réduit (Oke 1988).

Les valeurs du rapport H/W doivent être prises de manière moyenne pour l'ensemble d'un quartier. Les températures sont généralement assez homogènes à l'intérieur de chaque quartier morphologique (centre-ville, première périphérie, cité-jardin,...). Les grands espaces verts et les plans d'eau diminuent toutefois localement la température de l'air.

Bien que l'effet d'îlot de chaleur augmente les charges de refroidissement des bâtiments en été, il réduit la consommation énergétique de chauffage des bâtiments en hiver. Il doit donc être recherché ou limité en fonction du climat dans lequel on se trouve.

En Belgique, l'îlot de chaleur peut être considéré globalement comme un avantage pour limiter les consommations d'énergie des bâtiments en hiver, améliorer le confort des personnes à l'extérieur et favoriser la dispersion des polluants (grâce aux brises thermiques et à l'augmentation de la turbulence de l'air). Une différence de quelques degrés peut suffire à faire franchir un « seuil de confort ». Des études empiriques montrent qu'il est possible de gagner 5 à 7,5% du coût de l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments pour 1°C d'augmentation de la température moyenne (Oke 1988).

Lorsque le microclimat est très différent de conditions intérieures demandées, une grande quantité d'énergie sera nécessaire alors que une conception urbanistique adaptée permet d'obtenir un microclimat plus proche des valeurs intérieures et donc de nécessiter moins d'énergie. Le graphe ci-dessous permet de comprendre qu'une conception urbaine et architecturale adaptée au climat réduit substantiellement les consommations d'énergie du bâtiment. L'urbanisme microclimatique est donc essentiel dans le but de limiter les consommations énergétiques des bâtiments.



En première approximation, la puissance des pertes thermiques d'un bâtiment à un instant donné est proportionnelle à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. En général, la température intérieure est relativement stable et bien connue, alors que la température extérieure varie fortement dans le temps. Pour la prévision des consommations d'énergie, il faut faire une intégrale dans le temps des pertes thermiques du bâtiment :

$$Q_p = H \int_{\text{saison}; \theta_i > \theta_e} (\theta_i - \theta_e) dt$$

où H [W/K] est le coefficient de déperditions thermiques du bâtiment, qui est aussi la puissance nécessaire pour maintenir la température de l'air à l'intérieur du bâtiment (θ_i) un degré au-dessus de la température extérieure (θ_e).

Pour une habitation domestique, l'expérience a appris que dans notre pays une température intérieure moyenne (moyenne sur l'ensemble des pièces et moyenne sur les 24 heures de la journée) de 18°C pouvait être considérée comme représentative de la température de confort désirée. Et les apports gratuits (gains internes et externes) sont estimés en moyenne à environ 3°C pour les habitations. Si bien que le système de chauffage ne doit plus chauffer que jusque 15°C (le soleil et l'occupation permettant la montée de la température jusque 18°C). De même, s'il fait 15°C dehors, le chauffage peut être interrompu : on est en dehors de la saison de chauffe.

Comme la température extérieure varie d'un lieu à l'autre, la notion de **degré-jour** a été introduite pour permettre la détermination de la quantité de chaleur consommée sur une période donnée et pour effectuer des comparaisons entre des bâtiments situés dans des zones climatiques différentes. Le principe consiste donc à additionner, jour après jour, les écarts de température existant entre l'intérieur et l'extérieur. Si donc, par exemple, il fait 19°C à l'intérieur en moyenne de la journée, et 5°C à l'extérieur, on parlera de 14 degrés-jours. De même 3 journées à 0°C extérieurs seront comptabilisées comme 57 Degrés-Jours.

Le nombre de degrés-jours dépend donc de la durée de la saison de chauffe, de la température extérieure à partir de laquelle on considère ne plus devoir chauffer et de la température intérieure souhaitée. Les deux premiers points sont directement liés au microclimat local et sont directement influencés par l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ainsi, les consommations de chauffage sont réduites en ville par rapport à la campagne.

Le tableau ci-dessous montre la diminution du nombre de degrés jours de chauffage (base 18.3°C) pour différentes villes américaines par rapport aux valeurs données aux aéroports (Taha 1997).

Réduction des degrés-jours de chauffage grâce à l'effet d'îlot de chaleur urbain (Taha 1997)				
Ville	Degré-jours de chauffage			
	Urbain	Aéroport	Degrés-jours de chauffage gagnés	Différence en %
Los Angeles	384	562	178	-32
Washington DC	1300	1370	70	-6
St Louis	1384	1466	82	-6
New York	1496	1600	104	-7
Baltimore	1266	1459	193	-14
Seattle	2493	2881	288	-13
Chicago	3371	3609	238	-7
Denver	3058	3342	284	-8

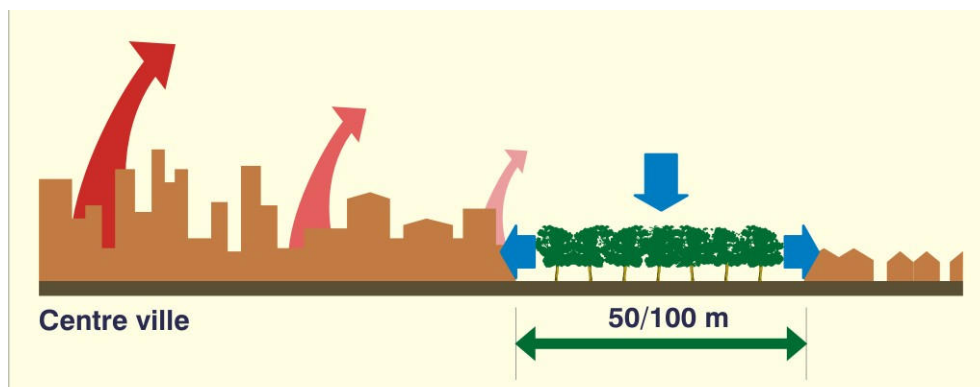
On voit que quelque soit le climat, l'effet d'îlot de chaleur urbain permet de limiter les consommations d'énergie dues au chauffage des bâtiments. Par contre, il intensifiera fortement l'inconfort généré par les surchauffes et augmentera les consommations d'énergie des systèmes éventuels de climatisation utilisés pour refroidir les bâtiments. L'effet d'îlot de chaleur est donc négatif pour les climats chauds et en périodes de surchauffes pour les autres climats.

Une conception adaptée de la ville permet de diminuer ou d'augmenter cet effet d'îlot de chaleur en fonction du résultat désiré. Ainsi, une conception microclimatique précise d'un quartier urbain dans les pays chauds peut contrebalancer l'effet d'îlot de chaleur et même générer un effet d'oasis, c'est-à-dire de fraîcheur par rapport à la température de l'air en dehors de la ville. C'est le cas du quartier Santa Cruz à Séville qui présente des températures moyennes de l'air en journée de 4 à 8°C inférieures à celles mesurées au niveau de l'aéroport de la ville. Cet effet d'îlot de fraîcheur est créé par la conception urbanistique de ce quartier traditionnel : rues très étroites (ombragées toute la journée), matériaux à fortes inertie, couleurs claires.

L'îlot de chaleur urbain engendre des températures minimales plus élevées (le nombre de jours de gel et de neige au sol diminue). Ainsi, ce phénomène modifie la moyenne des températures mais aussi l'écart des températures entre le jour et la nuit : l'amplitude des températures journalières est plus faible, ce qui diminue le potentiel de ventilation naturelle des bâtiments en ville.

Réintroduire de la végétation, des fontaines et des bassins en ville permet de réduire les périodes de surchauffes en milieu urbain. L'effet total du refroidissement dû à la végétation provient de l'effet combiné de son ombrage et de l'évapotranspiration.

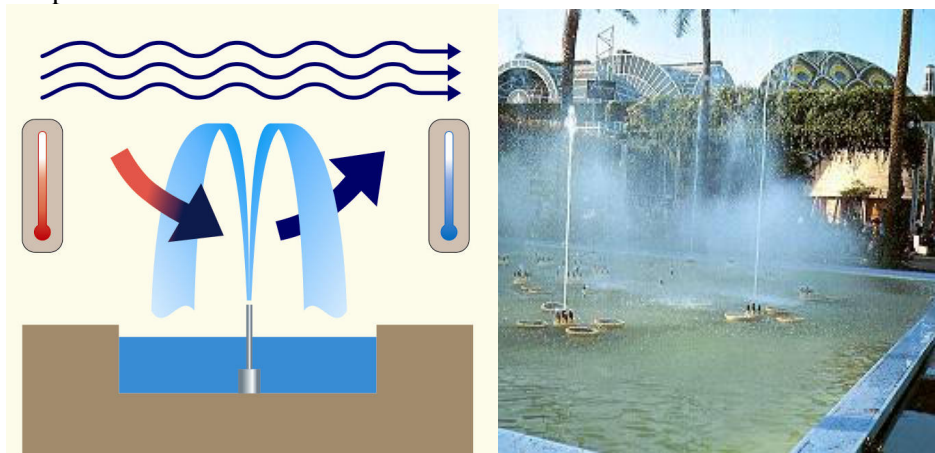
La végétation lorsqu'elle est regroupée en un bosquet dense réduit la température de l'air de 1 à 2°C pour un ciel clair en été (Nikolopoulou & al. 2004) On remarque une différence de température moyenne de 3.5°C entre un centre-ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variant de 50 à 100 mètres. Une convection horizontale des masses froides (végétation) vers les masses plus chaudes (constructions voisines) permet ce rafraîchissement (Izard & Guyot 1979). On peut étendre cette conclusion par la règle suivante très approximative : pour une texture urbaine relativement dense, on a une diminution de 0,8 K de la température ambiante de l'air pour une augmentation de 10% de la surface de la zone verte. Cet effet est noté, non seulement à l'intérieur des limites de l'aire verte mais s'étend aussi au-delà du parc lui-même. En cas de forte densité construite, il est donc utile d'avoir aussi une forte densité végétale.



Des surfaces de végétation plus larges que 100m ne sont pas nécessaires du point de vue de leur effet thermique sur le vent qui les traverse. Cet effet de réduction de la température de l'air autour des zones vertes est limité à une surface large de 100 à 500 m autour du parc à cause des phénomènes de convection. Par contre, de larges surfaces végétales denses (forêts,...) peuvent créer des brises thermiques qui auront alors un effet à plus large échelle sur l'urbanisation.

Il faut toutefois préciser que la présence de plusieurs zones urbaines relativement petites est plus efficace pour réduire l'effet d'îlot de chaleur qu'une seule zone très large (plusieurs km).

Par son inertie thermique, l'eau joue le rôle de tampon et atténue les fluctuations de température. Toutes les surfaces d'eau (fontaines, murs d'eau, canaux,...) diminuent la température par évaporation. De plus, les surfaces d'eau combinées à des mouvements d'air les traversant peuvent aussi contribuer à un rafraîchissement de l'air par convection.



Exposition universelle à Séville en 1992.
(Photo : Grupo de termotecnia 1994).

L'influence des surfaces d'eau sur la température de l'air dépend de différents facteurs :

- la longueur de la masse d'eau dans la direction des vents dominants,
- la vitesse de l'air,
- la présence ou l'absence de jets d'eau,
- la densité construite de la zone sous le vent de la surface d'eau.

Lors du projet de l'expo'98 à Lisbonne, des études scientifiques ont été réalisées avec un logiciel CFD pour évaluer l'impact de la rivière Targus sur la température de l'air sur le site de l'exposition. La rivière Targus présente 14 km de longueur de refroidissement et le site de l'exposition s'étend sur 600m sous le vent de la rivière. Pour une vitesse de vent d'1 m/s, la température est de 6°C inférieure dans les 100 premiers mètres à partir de la rivière. Ensuite, il y a réchauffement progressif de l'air de telle façon que la température de l'air à l'extrémité du site de l'expo correspond à la température ambiante sans l'impact de la rivière.

Des plus petites surfaces d'eau ont bien entendu une influence réduite sur la température de l'air environnante. Selon l'université de Séville, pour un espace ouvert et pour une vitesse de vent de 1m/s, l'influence d'un lac de 100m de large dont la température de l'eau est de 20°C inférieure à celle de l'air ne diminuerait la température de l'air sur ses bords que de 1°C. Pour les mêmes hypothèses, un lac de 50m donnerait une réduction de 0.5°C, un lac de 200m une réduction de 1.5°C

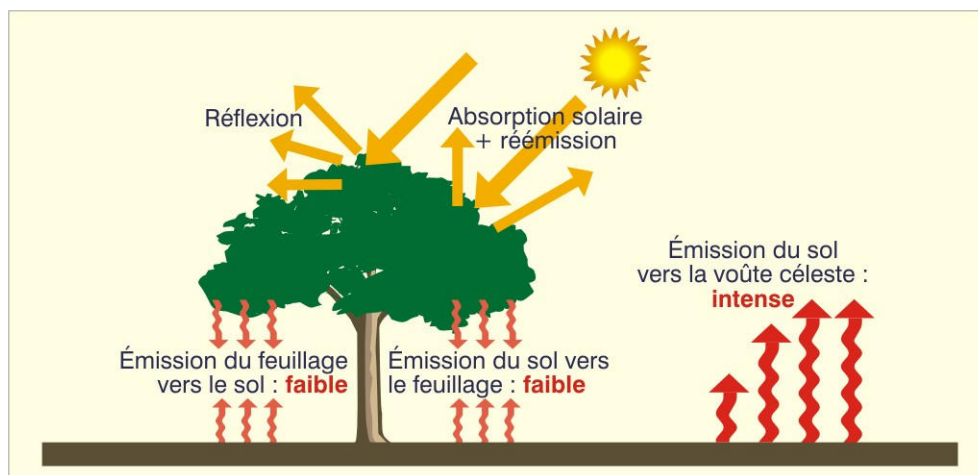
et un lac de 400 m une réduction de 2.5°C. Par contre, dans un environnement plus confiné, tel qu'une rue ou une cour, un bassin d'eau aura un impact beaucoup plus important, surtout s'il remplace des matériaux de construction de faible albedo qui se seraient échauffés au soleil.

La conclusion est donc que les surfaces d'eau n'ont qu'une faible influence sur la température de l'air en zone ouverte, sauf si ces surfaces deviennent de très grande dimension. Des bassins de petite dimension peuvent toutefois avoir une influence réelle sur la température de l'air d'espaces urbains fermés et protégés du vent, surtout si ces bassins sont agrémentés de jets d'eau ou accompagnés d'un système de pulvérisation d'eau dans cet espace public.

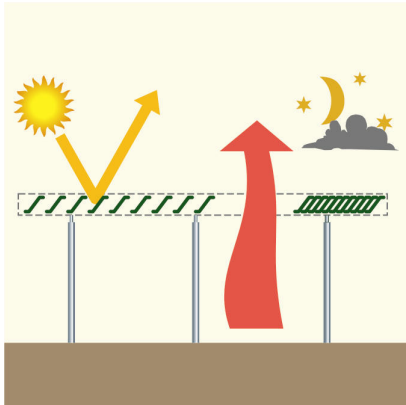
Pour déterminer précisément la température de l'air en ville, il faut donc tenir compte à la fois des températures extérieures en zone rurale, de la force du vent et de la morphologie des constructions mais aussi des matériaux utilisés, de la présence de végétation ou de bassins d'eau. L'interaction de ces différents éléments est un phénomène très complexe qui rend très difficile l'évaluation précise de la température de l'air en milieu urbain.

Même si on a dit que la température de l'air en ville est généralement homogène par quartier morphologique, il est possible d'avoir des poches de surchauffes ou de fraîcheur dans les endroits dits confinés, c'est-à-dire dans les lieux où l'échange entre l'air de ce site et l'air extérieur est réduit. Ces lieux confinés peuvent donc devenir par exemple des poches de fraîcheur dans les pays chauds s'ils sont ombragés, qu'ils contiennent de la végétation ou des fontaines. L'aspect confiné d'un lieu dépend surtout de son rapport H/W ainsi que la position des ouvertures de l'espace par rapport au vent.

Ainsi, les pergolas ou des plantations dont le feuillage couvre la presque totalité de l'espace d'une cour ou d'une place relativement confinée servent de séparation entre l'air au-dessus et en dessous de son feuillage. Cette séparation permet de conserver la fraîcheur à l'intérieur d'un espace urbain. La température est plus faible de jour à cause de leur effet d'ombrage. Par contre, la nuit, la végétation empêche l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte céleste, limitant ainsi la chute de température nocturne. Ainsi, les écarts de température entre la nuit et le jour sont moins importants dans un espace couvert de végétation que pour un espace public ouvert au ciel.



Des auvents peuvent également jouer ce rôle de séparateur de l'air pour favoriser un microclimat spécifique. Dans les pays chauds, il est alors conseillé de placer des auvents amovibles qu'on peut retirer la nuit pour profiter en plus d'un refroidissement nocturne de l'espace par rayonnement vers le ciel.



Ainsi, les espaces confinés permettent de créer des ambiances thermiques spécifiques alors que les grands espaces ouverts restent très dépendants de la température du vent. Des espaces de transition, tels que des galeries couvertes, sont par exemple très favorables pour diminuer les différences de température trop importantes entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.



(Photos : S. Reiter).

La température de l'air peut également être influencée localement par la température des surfaces environnantes. Les caractéristiques des matériaux de construction des bâtiments, du revêtement de sol et du mobilier urbain jouent un rôle par rapport à l'équilibre thermique local des piétons.

D'un point de vue urbanistique, les gabarits des bâtiments, l'orientation des rues et le profil hauteur/largeur interagissent avec les matériaux utilisés (albédo et inertie) pour déterminer leurs températures de surfaces.

L'albédo est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Cette caractéristique est essentiellement dépendante de la couleur du matériau : un corps clair réfléchit une grande partie de l'énergie solaire reçue alors qu'un corps foncé en absorbe la plus grande part. L'albédo des matériaux influence seulement les températures de surfaces des matériaux exposés au soleil. A partir du moment où une surface est ombragée, sa couleur a peu d'effets sur sa température.

L'inertie des matériaux caractérise leur capacité à accumuler de la chaleur, puis à la restituer avec un déphasage temporel. Elle permet donc de répartir les apports de chaleur dans le temps, notamment en atténuant les différences de température entre le jour et la nuit ; elle permet aussi d'éviter les surchauffes d'un espace en été. Si on désire profiter de l'inertie des matériaux pour le confort des personnes dans les espaces publics, il importe de favoriser le stockage direct : en plaçant des masses de fortes inerties là où le soleil frappe directement c'est-à-dire essentiellement les façades sud et les planchers. Lorsque l'ensoleillement a cessé, toute la chaleur emmagasinée par les parois est progressivement restituée. L'inertie des matériaux est donc particulièrement intéressante dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante. Pour jouer sur l'inertie d'une surface, on peut choisir le type de matériau ainsi que la forme de la surface (par exemple, une surface ondulée, offre une surface d'accumulation supérieure à celle d'une paroi droite...).

Une caractérisation quantitative de l'albédo et de l'inertie des matériaux a été donnée dans cette thèse lors de l'élaboration de critères quantitatifs pour le confort thermique extérieur.

Evaluer l'îlot de chaleur urbain

Vu la complexité du comportement thermique urbain, il n'est pas possible à l'heure actuelle de prendre en compte de manière simple et très précise la température réelle en milieu urbain. **Nous avons créé un algorithme pour évaluer de manière très simplifiée quelques températures types pour l'air en milieu urbain à partir de la température de l'air à la station météorologique.** Cet algorithme a été élaboré à partir d'une étude bibliographique étendue. Cette méthode d'évaluation de la température de l'air en milieu urbain doit toutefois être considérée comme une approximation moyenne simplifiée de ce phénomène très variable.

Nous avons créé l'algorithme ci-dessous pour des urbanisations européennes (ou de morphologie semblable) situées dans un climat tempéré froid. Les données trouvées dans la littérature ne permettent pas de déterminer un algorithme précis pour l'ensemble des climats.

Soit T_m , la température de l'air à la station météorologique le jour et l'heure considéré, avec ou sans soleil

T_a la température ambiante sur le site au moment considéré,

T_c , l'influence d'une couverture de l'espace public (pergola,...)

T_u , l'influence de l'urbanisation

T_q , l'influence du quartier

T_v , l'influence de la végétation

T_e l'influence de l'eau

F_v est l'influence de la vitesse du vent

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$$

1/ T_c

Si l'espace présente une couverture en dur (pierre,...), une pergola ou une couverture végétale quasiment continue (arbres denses,...), $T_c = T_{mc} - T_m$.

On obtient alors, $T_a = T_{mc} + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$, où T_{mc} est la température de l'air à la station météorologique par ciel couvert le même jour et à la même heure.

Si l'espace est ouvert sur le ciel, $T_c = 0$.
On obtient alors : $T_a = T_m + (T_u + T_q + T_v + T_e) \cdot F_v$.

2/ T_u

La valeur de T_u peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction de la taille de la ville (supérieure ou inférieure à 1 million d'habitants), de la saison et de la période de la journée.

Valeur de T_u en °C						
Heure	Grande ville ($\geq 1\ 000\ 000$ habitants)			Petite ville ($< 1\ 000\ 000$ habitants)		
	Ete	Printemps/ automne	Hiver	Ete	Printemps/ automne	Hiver
6 à 12h	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.4
12 à 16h	0	0	0	0	0	0
16 à 22h	2	1.75	1.5	1.5	1.35	1.2
22 à 6 h	3	2.6	2.2	2	1.75	1.5

3/ T_q

La valeur de T_q peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du quartier dans lequel est situé l'espace public considéré. T_u est le facteur d'influence dû à l'urbanisation, la saison et le moment de la journée, calculé au point ci-dessus.

Valeur de T_q en °C	
Quartier d'un centre-ville très dense ($H/W \cong 2$)	$0.25 T_u$
Quartier urbain dense ($H/W \cong 1$)	0
Quartier urbain périphérique et aéré ($H/W \cong 0.5$)	$- 0.5 T_u$
Quartier suburbain : les maisons ne sont pas mitoyennes	$-(2 T_u) / 3$

4/ T_v

Si le site est situé à une distance inférieure ou égale à 500m par rapport à un espace présentant une végétation dense (d'une longueur supérieure à 50m), $T_v = - 1.5^\circ\text{C}$; autrement, $T_v = 0$.

5/ T_e

La valeur de T_e peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du type de surface d'eau présente dans l'espace public ou sur un de ses bords et de l'aspect ouvert ou confiné de l'espace public. Un espace est confiné quand il est de petite dimension et qu'il est fermé par des constructions sur tous ses côtés ; citons par exemple une cour, une place étroite,...

Valeur de T_e en °C		
Espace public ouvert ou de grande taille	Surface d'eau $\geq 100\text{m}$ de large	- 1
	Surface d'eau $\cong 50\text{ m}$ de large	-0.5
	Surface d'eau $\cong 10\text{m}$ de large	-0.1
Espace public confiné	Bassin d'eau	-0.5
	Fontaine ou bassin avec jets d'eau	-1

6/ Fv

La valeur de Fv dépend de V, la vitesse du vent à la station météorologique (à 10m de haut) ainsi que du type de quartier.

Valeur de Fv		
Quartier urbain dense (H/W ≅ 1) à très dense (H/W ≅ 2)		1
Quartier urbain périphérique et aéré (H/W ≅ 0.5) ou quartier suburbain	V ≤ 2m/s	1
	2 < V ≤ 5m/s	0.5
	V > 5m/s	0

7/ Ta

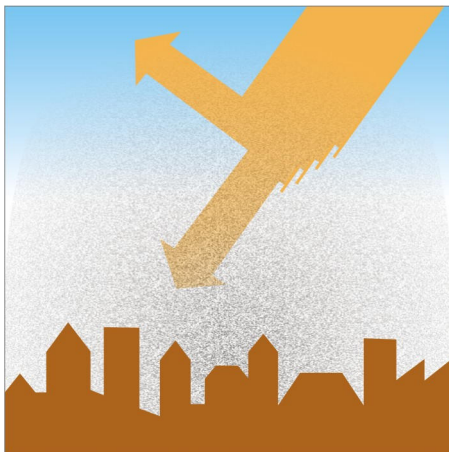
Ta peut alors être calculé à partir de la formule :

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$$

Cet algorithme a été élaboré de manière théorique à partir des publications lues sur le sujet pour un climat tempéré froid et une urbanisation européenne mais il serait intéressant de pouvoir le valider ou l'améliorer à partir de mesures réalisées dans des sites réels en Belgique.

3.2.3 La modification du rayonnement solaire en ville

Lors de la traversée de l'atmosphère, les radiations solaires sont absorbées et diffusées par les molécules d'air et les aérosols; elles sont également absorbées et réfléchies par les poussières et microgouttelettes en suspension. De manière générale, ces troubles sont plus importants en ville qu'à la campagne. En effet, au-dessus des villes, la concentration en CO, CO₂ et SO₂ est de 5 à 25 fois plus importante qu'en milieu rural créant ainsi un dôme de pollution qui limite la disponibilité de la lumière naturelle en milieu urbain.



Une étude réalisée par l'IRM (Joukoff 1996) analyse les effets de la pollution de l'air sur la disponibilité de l'énergie solaire dans la zone de Bruxelles, dans le cadre de l'action de la Commission Européenne : « European solar microclimates ». Sur une période de 35 mois, de juillet 87 à mai 90, il apparaît que le rayonnement solaire global varie entre 93 et 98% de la valeur de référence donnée à la station météorologique. La valeur la plus faible correspond à la situation industrielle du nord de la ville. Les valeurs peuvent fluctuer fortement d'un jour à l'autre mais

mensuellement on peut voir que l'environnement atmosphérique n'affecte pas dramatiquement l'énergie solaire disponible. (Joukoff 1996).

Ainsi, l'influence de la pollution d'une agglomération de la taille de Bruxelles en terrain plat sur le rayonnement solaire global disponible au-dessus des toits est de l'ordre de 5% (Joukoff 1996). Pour des applications nécessitant des niveaux d'éclairage précis, on peut donc minorer les valeurs météorologiques d'environ 5%. Pour des agglomérations très polluées, la réduction du rayonnement solaire global en ville au niveau des toits par rapport à la campagne peut toutefois atteindre 20% (Landsberg 1981).

De nombreuses études ont montré également que la durée d'ensoleillement est réduite par l'atmosphère urbaine. Dans le centre de Londres, la durée d'ensoleillement est plus faible d'environ 16% que dans la campagne environnante. A Liège, en Belgique, une perte de 55 minutes d'ensoleillement par jour est signalée à cause de la pollution. (Santamouris & al. 2001)

Par ailleurs, la quantité de rayonnement solaire reçue par une surface en ville est généralement nettement inférieure à celle captée par une surface équivalente en zone rurale à cause de l'effet d'obstruction des bâtiments. Cependant, la lumière naturelle est une des qualités les plus essentielles qui influencent l'ambiance d'une ville ou d'un espace public. La lumière solaire disponible dans les espaces publics, rues, places, parcs est un élément très important pour le confort des piétons. Une attention spéciale doit être portée à la conception solaire urbaine de manière à créer des espaces publics attirants. La pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur du tissu urbain nécessite une attention particulière, surtout dans les villes très denses.



(Photo : M. Bodart).



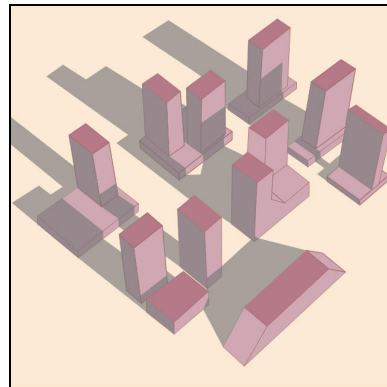
(Photo : S. Reiter).

Dans le contexte urbain, le potentiel d'ensoleillement disponible et donc les gains solaires possibles dépendent fortement de la présence du gabarit des bâtiments proches ainsi que des contraintes d'orientation des façades pour conserver l'alignement des rues et des bordures de places. Ce sont les dimensions de l'espace public, son orientation et la hauteur des bâtiments qui produisent l'impact le plus important sur la pénétration du rayonnement solaire direct en milieu urbain.

Un masque solaire est un corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface que l'on désire ensoleillée. En ville, il peut être difficile de capter le rayonnement solaire dans un espace à cause de l'ombrage créé par les bâtiments qui le jouxtent.

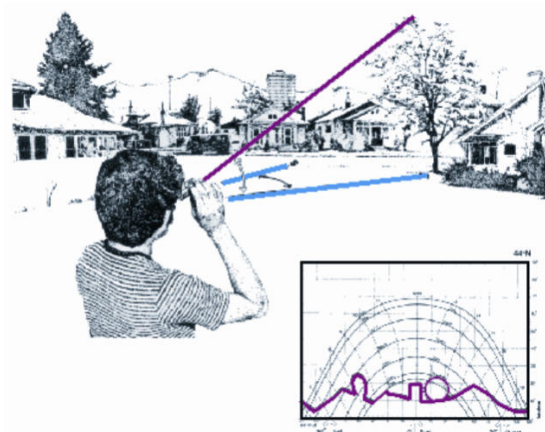
En Belgique, les immeubles qui masquent le soleil sont globalement considérés comme désagréables. Généralement, ils apportent un peu d'ombrage en été mais deviennent, par contre, de réels obstacles à l'ensoleillement en hiver puisque le soleil est plus bas dans le ciel à cette période. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil d'hiver entre 9h et 15h, réduiront considérablement le bénéfice des gains solaires pour les bâtiments et l'utilisation des espaces publics pendant cette saison. De plus, l'ombrage fourni par les constructions voisines durant l'été n'est généralement possible que lorsque le soleil n'est pas trop haut dans le ciel; elle est donc surtout valable pour les orientations est et ouest.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer précisément les périodes pendant lesquelles le rayonnement solaire se trouve intercepté par un obstacle avant d'atteindre le sol d'un espace public. C'est la géométrie solaire qui détermine l'ombrage créé par les masques solaires. Cet ombrage varie heure par heure, jour par jour et peut se calculer à partir des diagrammes solaires. Il existe également des logiciels qui calculent les ombrages pour un site défini. S'il est essentiel de tenir compte des ombrages provoqués par les obstacles avoisinant le terrain considéré, il faut également prendre en considération l'évolution de ce site dans l'avenir (bâtiments futurs,...).



(Photo : S. Reiter).

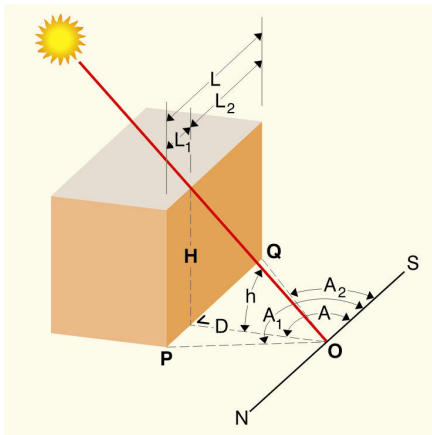
La méthode des projections solaires cylindriques détermine les masques solaires, que subit un point de l'espace, par la transcription de son panorama sud sur le diagramme solaire relatif à la latitude du lieu considéré. On repère ainsi facilement les périodes où l'ensoleillement est disponible et on peut calculer les facteurs de réduction de l'ensoleillement dus à la présence des obstacles environnants.



(Reiter & De Herde 2001).

L'exemple ci-dessous permet de mieux comprendre cette technique: il s'agit d'analyser l'impact d'un bâtiment sur l'ensoleillement d'un point. Soit le point O situé à une certaine distance D à l'ouest d'un bâtiment. Pour que le point O soit ombragé, il faut que :

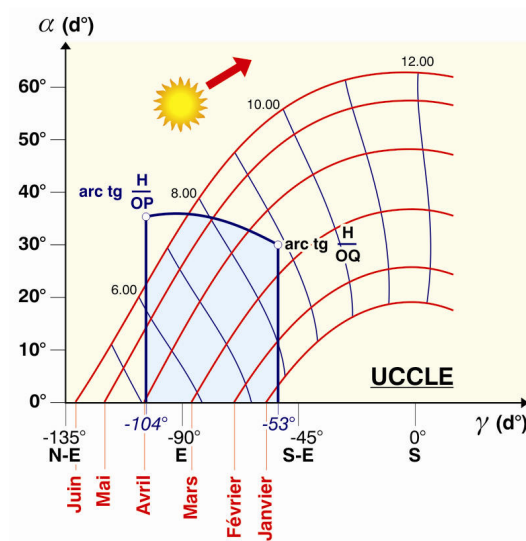
- l'azimut du soleil (A) soit compris entre l'azimut de la droite OP ($A_1 = A + (-\text{arc tg}(L_1/D))$) et l'azimut de la droite OQ ($A_2 = A - (\text{arc tg}(L_2/D))$), ces deux segments de droite joignant O aux extrémités du bâtiment.
- la hauteur du soleil (h) soit inférieure à la hauteur angulaire du point au sommet du bâtiment situé dans le même plan vertical que le soleil. Les hauteurs angulaires des différents points de faîte du bâtiment, vu du point O, sont donnés par une relation du type $h = \text{arctg}(H/D)$.



Si on donne une valeur de 20m à la distance D et les dimensions suivantes au bâtiment: L=20m, L₁=5m, L₂=15m, H=30m, le point O sera ombragé par les azimuths du soleil compris entre -104° et -53° et pour les hauteurs du soleil inférieures aux hauteurs angulaires données par la formule.

La figure ci-contre donne une représentation des résultats pour un bâtiment situé à Uccle. La représentation sur le diagramme solaire de Uccle de l'ombrage du point O par le bâtiment montre entre autres que le point O est ensoleillé:

- toute l'année, à partir de 9h du matin jusqu'au coucher du soleil.
- en janvier, à partir du lever du soleil au coucher du soleil.
- en juin, du lever du soleil à 5h45' et de 7h45' au coucher du soleil.



L'effet de rue est caractérisé par le masque solaire que créent les bâtiments situés de l'autre côté de la rue. Il dépend de la hauteur de ces constructions et de la distance qui sépare les deux côtés de la rue. Une morphologie de rues dont le rapport hauteur/largeur (H/W) est élevé réduit fortement l'exposition directe des surfaces de la rue. La forme bâtie et sa densité sont donc des éléments critiques pour l'ensoleillement des espaces publics urbains. Ci-dessous, la rue de la photo de gauche sera plus lumineuse et plus souvent ensoleillée que la rue de la photo de droite.



(Photo : Architecture et Climat)



(Photo : S. Reiter).

La question qui se pose est quel est l'angle d'obstruction maximal afin de fournir une disponibilité solaire suffisante dans les espaces publics urbains? Le grand avantage d'une règle de disponibilité solaire basée sur un angle d'obstruction vertical est sa grande simplicité. Son inconvénient est que le critère fixé risque souvent d'être difficile à appliquer en zone urbaine du fait de la grande variété des hauteurs de bâtiments et de la densité du bâti.

Pour les espaces publics de détente, tels que les places ou les rues commerçantes, nous estimons en première approximation qu'il est important d'assurer un ensoleillement du sol de l'espace public à 12h le 21 décembre, à 16h le 21 septembre et le 21 mars et à 18h le 21 juin. Ces critères correspondent à un angle d'obstruction maximal de 15.2° pour la Belgique, ce qui impose que le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments et la largeur de la place soit inférieur à 0.27 ($H/W < 0.27$).

Bien sûr, ceci est une règle simpliste. Il est fondamental d'étudier les zones d'ombre et d'ensoleillement sur une place avant de l'aménager. Par exemple la position d'une terrasse de café sur l'espace public peut dépendre de la position du soleil.

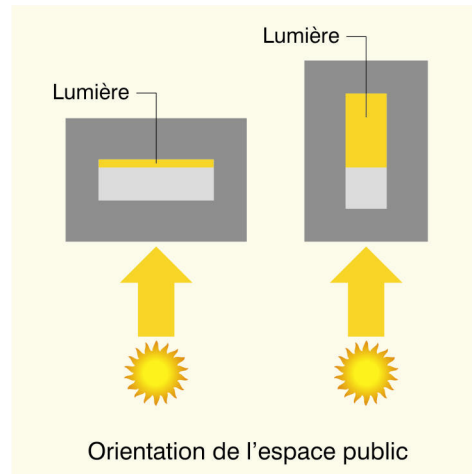


(Photo : S. Reiter).

L'orientation d'un espace public est également essentielle pour déterminer sa disponibilité à l'ensoleillement. Pour les places rectangulaires, l'orientation du grand axe peut jouer un rôle important dans la pénétration des rayons solaires. Si la place est longue et étroite, le soleil d'hiver va la pénétrer plus profondément pour une orientation nord-sud

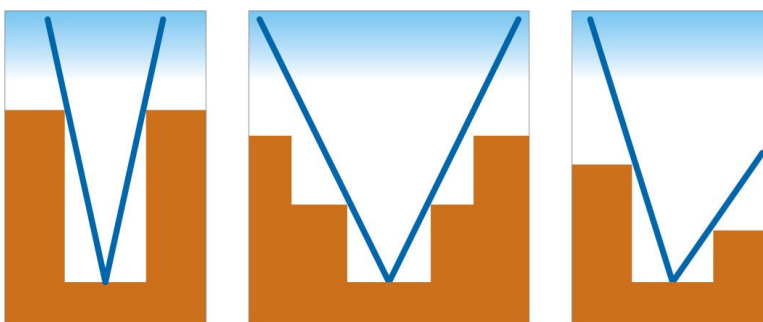


(Photo : S. Reiter).



Les rues et les îlots urbains auront en revanche une orientation préférentielle en fonction de l'ensoleillement désiré sur les façades des bâtiments. En Belgique, une orientation E-O des rues est donc à privilégier pour assurer un bon ensoleillement des façades tournées vers le sud.

Par ciel couvert, l'orientation de l'espace public n'a pas d'influence sur son ambiance lumineuse. C'est uniquement l'angle de vue du ciel qui définit la possibilité de pénétration du rayonnement solaire diffus et donc la disponibilité sous ciel couvert de la lumière naturelle. Une rue dont la hauteur est faible sera toujours mieux éclairée au niveau du sol qu'une rue de même largeur mais dont les bâtiments sont plus élevés. Le graphe ci-dessous montre les différents angles de vue du ciel au niveau du sol pour trois types de morphologies urbaines différentes. Notons que dans le cas de bâtiments présentant un décalage au niveau des étages supérieurs, le facteur de vue du ciel est fortement augmenté.

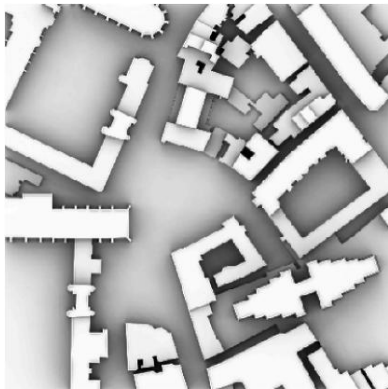


Le facteur de vue du ciel (sky view factor – SVF) de 1 signifie que la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction – par exemple depuis un champ isolé. Un SVF de 0 signifie que la vue du ciel est totalement obstruée. Ainsi, dans une ville médiévale avec des rues étroites on s'attend à un SVF faible – autour de 0.2 – alors que dans un environnement urbain plus ouvert avec des rues et des espaces larges, le SVF sera plus près de 0.8. Dans une ville donnée, il peut y avoir des valeurs de SVF typiques d'une zone urbaine mais il peut aussi y avoir des variations significatives du SVF à l'intérieur du tissu urbain.

Le tableau ci-dessous compare le pourcentage d'ouverture du ciel de trois places célèbres (Littlefair & al. 2000).

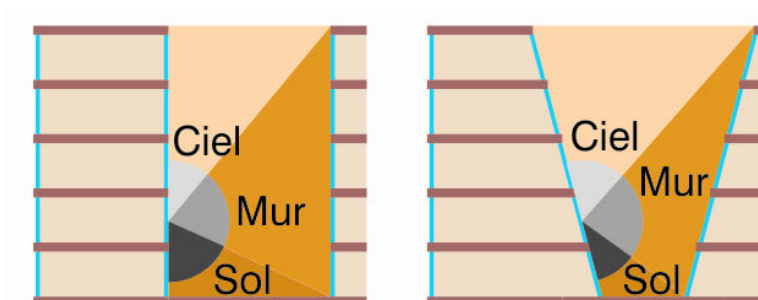
Place	Surface	Hauteur construite	Facteur de vue du ciel
Place de l'amphithéâtre à Lucca	75m x 50m	14m	0.66
Grand Place à Arras	190m x 100m	10m	0.88
Place des Vosges à Paris	140m x 140m	20m	0.76

L'image ci-dessous montre la répartition du facteur de vue du ciel pour le All Saint's Garden à Cambridge. Les tons clairs correspondent aux facteurs de vue du ciel élevés (Steemers & al. 2004).



(Steemers & al. 2004).

L'inclinaison des murs de la place ou de la rue représente un paramètre essentiel pour le facteur de vue du ciel. Par exemple, des murs inclinés à 10° , pour une place carrée construite de manière à ce que la surface totale des constructions soit identique au cas où les murs seraient droits, apportent considérablement plus de lumière au niveau du sol. En effet, la variation des composantes directe et réfléchie de la lumière naturelle dans un espace public varie lorsque l'inclinaison des murs augmente. En Belgique, il est fortement conseillé d'adopter une forme évasée dès que la hauteur des bâtiments atteint le double de la largeur de la rue. Les murs ne doivent pas être obliques pour autant, il suffit de décaler le mur de façade à chaque étage.



Modification de la distribution lumineuse en fonction de l'inclinaison des parois qui bordent un espace public.

Les facteurs de réflexion des surfaces ont également un impact sur l'ambiance lumineuse d'un lieu. Au plus les facteurs de réflexion des matériaux de construction, du sol et du mobilier urbain sont élevés, au plus l'ambiance sera

lumineuse. Ainsi, l'eau, en réfléchissant le ciel et l'environnement, intensifie l'impression lumineuse d'un lieu.



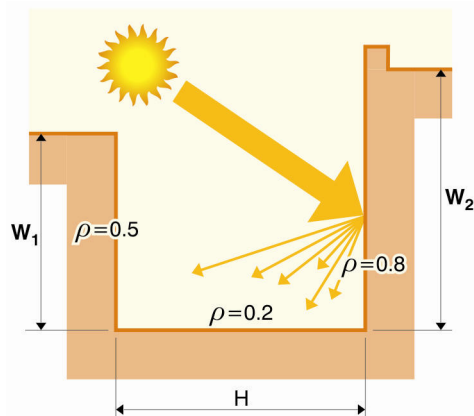
(Photos : S. Reiter).

Par ciel serein, c'est le facteur de réflexion des surfaces verticales ensoleillées qui est le plus important pour les niveaux d'éclairage de l'espace public. Les façades exposées au sud renvoient la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face : leur coefficient de réflexion devrait donc être élevé. En revanche, par ciel couvert, c'est le facteur de réflexion du sol qui devient le facteur important du point de vue de la quantité de lumière dans l'espace public. Donc, en Belgique, le facteur de réflexion du sol est très important du point de vue visuel car le ciel y est souvent couvert. Des surfaces réfléchissantes placées au sol telles qu'un dallage brillant ou des couleurs claires peuvent contribuer à diffuser davantage de lumière.



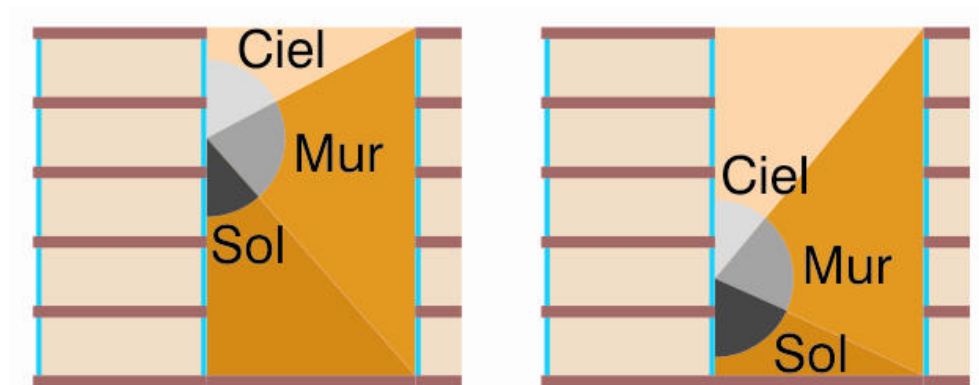
(Photos : S. Reiter).

Le graphe ci-dessous montre un espace public dont les **coefficients de réflexions** sont choisis pour favoriser l'éclairage naturel ; la surface W2 est orientée vers le sud alors que la surface W1 est orientée vers le nord. La surface W2 réfléchit donc la lumière vers la surface W1 et l'espace public. Le bâtiment W1, situé au sud du bâtiment W2, permet un bon ensoleillement de W2 grâce à sa petite taille.



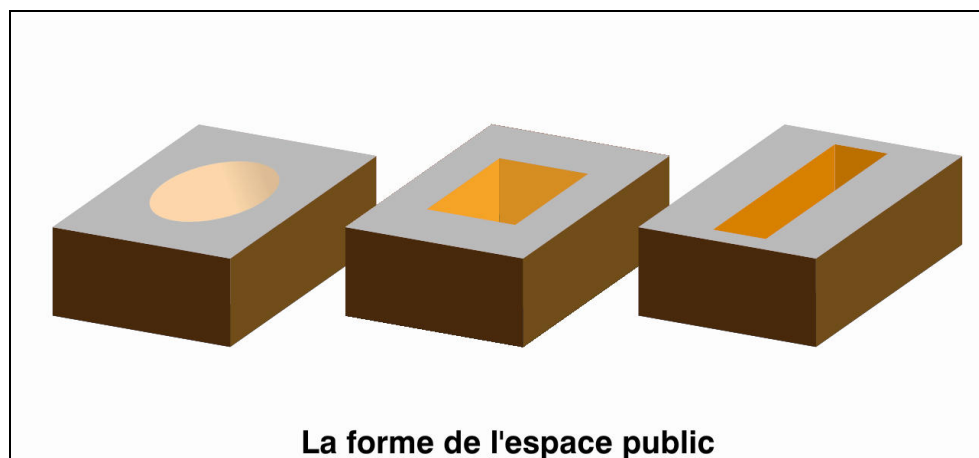
Il faut encore indiquer que lorsque l'espace public est de petite dimension et que la hauteur des bâtiments est importante, c'est-à-dire pour un rapport H/W élevé, la luminosité est davantage influencée par le facteur de réflexion des murs. Notons également que les plantes réfléchissent en général peu de lumière. Elles ont toutefois un effet positif sur l'agrément visuel de l'espace.

Notons que pour des espaces publics étroits, la lumière qui atteint les niveaux supérieurs des bâtiments est plus importante que celle qui pénètre jusqu'au sol. Vu que le facteur de réflexion des murs est normalement supérieur à celui des vitrages, l'augmentation de la surface des murs dans la partie supérieure des bâtiments améliore la luminosité de l'ensemble de la rue et accroît la lumière disponible aux étages inférieurs de ces bâtiments. Adapter la taille des ouvertures à l'étage auquel elles appartiennent est donc également un élément essentiel de l'efficacité de la distribution lumineuse en ville. Ainsi, nous recommandons que les surfaces vitrées des étages supérieurs soient plus petites que celles des étages inférieurs.



Modification de la distribution lumineuse entre les différents étages des bâtiments qui bordent un espace public.

Pour les places de petites dimensions, on peut aussi noter que plus le périmètre d'une place est petit, pour une même surface d'ouverture en toiture, au plus elle est lumineuse. En effet, lorsque le périmètre est réduit, il y a moins de surfaces pour absorber la lumière qui pénètre dans cet espace. C'est ainsi qu'on peut affirmer que la meilleure forme pour une très petite place est un cercle et qu'un carré est plus avantageux qu'un rectangle.

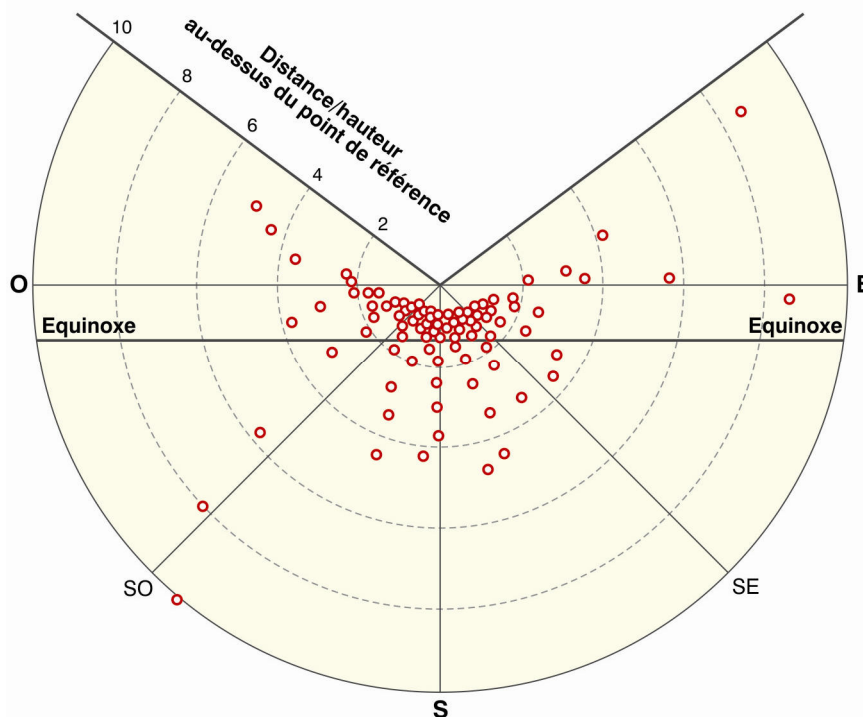


Du point de vue de la consommation énergétique des bâtiments, le critère idéal pour une façade orientée au sud est d'assurer son ensoleillement à midi le 21 décembre, ce qui n'est pas souvent réalisable pour des bâtiments situés en ville dans le nord de l'Europe. Pour Bruxelles, ce critère idéal correspond à un angle d'obstruction de 15.8° , ce qui est pratiquement égal à l'angle d'obstruction nécessaire pour assurer un ensoleillement de l'espace public pour les piétons.

De plus, il faut souligner, qu'en zone urbaine, les obstructions peuvent être inégales. On doit tenir compte des bâtiments situés juste en face de l'édifice étudié mais aussi des bâtiments qui interceptent une partie du rayonnement solaire direct ou diffus même s'ils sont décentrés. Dans ces conditions, il y a de fortes chances pour qu'une partie du bâtiment analysé soit située de telle façon que l'angle d'obstruction soit dépassé. Pour résoudre ce problème, il est utile de se donner une règle plus réaliste et plus souple, ce qui nécessite de :

- définir une zone angulaire en plan à l'intérieur de laquelle l'angle d'obstruction doit impérativement être limité, alors que les obstructions venant des autres directions sont acceptées.
- choisir un angle d'obstruction plus réaliste par rapport aux configurations urbaines.

Une zone angulaire de préférence est facile à déterminer : la zone du ciel qui va du sud-est au sud-ouest comprend la majorité du rayonnement solaire direct utile en hiver. Le graphe ci-dessous est un indicateur de la disponibilité solaire pour Manchester (53.5°N). Chacun des 100 points représente 1% des heures d'ensoleillement probable. On peut estimer que ce graphe peut s'appliquer à la Belgique (Bruxelles est à 50.8°N).



Indicateur de la disponibilité solaire à Manchester (Littlefair & al. 2000).

Ce schéma nous permet de conclure qu'il est spécialement important de limiter l'angle d'obstruction vertical dans la zone allant du SE au SO. Les bâtiments les plus élevés devraient donc être placés au nord.

Choisir un angle d'obstruction réaliste en milieu urbain est plus délicat. Pour un bon ensoleillement des façades, on peut prendre les règles suivantes :

- pour une latitude supérieure à 50°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour les 21 janvier et le 21 novembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à «70°-latitude du site».
- pour une latitude comprise entre 46.5°N et 50°N, un angle d'obstruction maximal de 20° peut être choisi.
- pour une latitude inférieure à 46.5°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour le 21 décembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à «66.5° - latitude du site ».

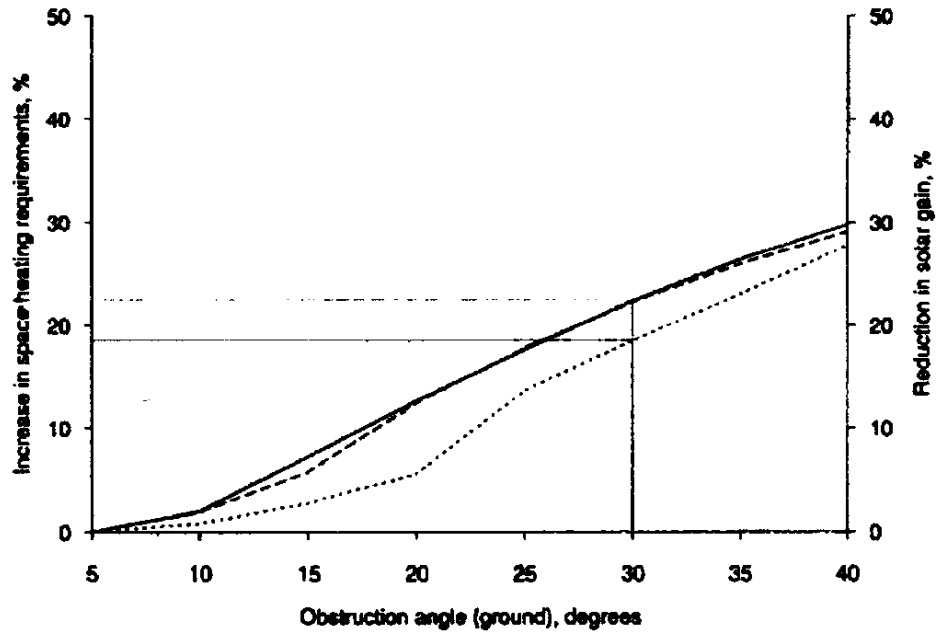
Ces angles d'obstruction maximaux sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Littlefair & al. 2000).

Latitude (°N)	Angle d'obstruction vertical maximal d'une façade solaire pour les orientations allant du SE au SO pour assurer une possibilité raisonnable de profiter des gains solaires en hiver
50° ou plus	70 - latitude
46.5 à 50°	20
< 46.5°	66.5 - latitude

En Belgique, cela nous conduit à limiter les angles d'obstructions verticaux à 19.2° pour les orientations allant du sud-est au sud-ouest. Pour un bâtiment situé dans un tissu dense, on peut toutefois conseiller de mesurer l'angle d'obstruction vertical à partir de 2m de haut plutôt qu'à partir du sol.

Si l'angle d'obstruction à l'ensoleillement reste inférieur à la valeur de référence pour l'ensemble de l'angle allant du sud-est au sud-ouest, une conception solaire passive du bâtiment est vraiment conseillée. Lorsque l'ensemble de la zone sud-est-sud-ouest est coupée de l'ensoleillée au-delà des limites fixées, la création d'une architecture qui prenne en compte les gains solaires est à abandonner ou bien il faut changer de site. Entre les deux, une étude plus poussée est nécessaire pour évaluer les gains solaires disponibles. Si ce critère n'est pas respecté sur une partie du champ allant du SO au SE, ou par évaluer l'impact d'une nouvelle construction sur une situation existante, on peut calculer les gains solaires probables durant la saison de chauffe avec et sans l'obstruction. Si la situation avec obstruction ne descend pas en-dessous de 0.9 fois la situation sans cet obstacle, une nouvelle construction n'est pas gênante pour son voisinage. Pour un nouveau projet, si la situation avec une obstruction pour les orientations entre le SE et le SO ne descend pas en-dessous de 0.9 fois la situation sans cet obstacle, une conception solaire passive est appropriée.

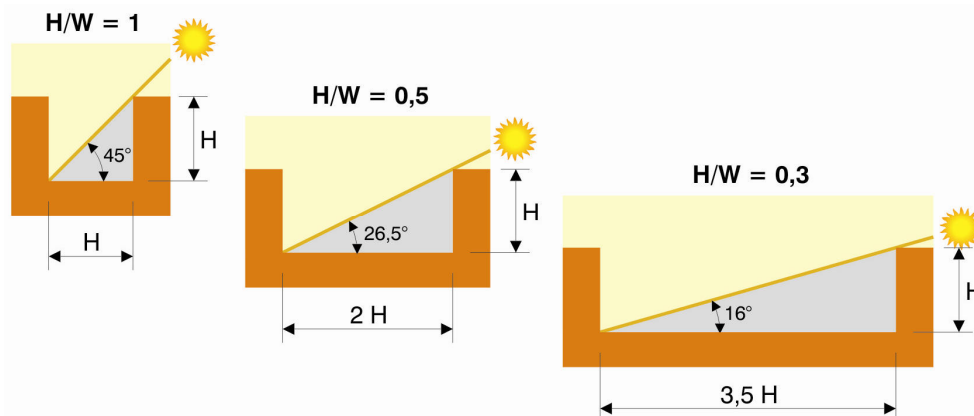
Simos Yannas a établi le graphe ci-dessous à partir de simulations réalisées à l'aide du logiciel SERI-RES. Ce diagramme (Yannas 1996) donne l'accroissement de l'énergie de chauffage nécessaire et la réduction en terme de gains solaires, exprimés en pourcents, en fonction de l'angle d'obstruction solaire pour des maisons dont les principales ouvertures sont orientées vers le sud et pour trois localisations différentes en Angleterre : Dundee 57N (ligne solide), Sheffield 53N (ligne en tirets) et Plymouth 50N (ligne pointillée).



(Yannas 1996).

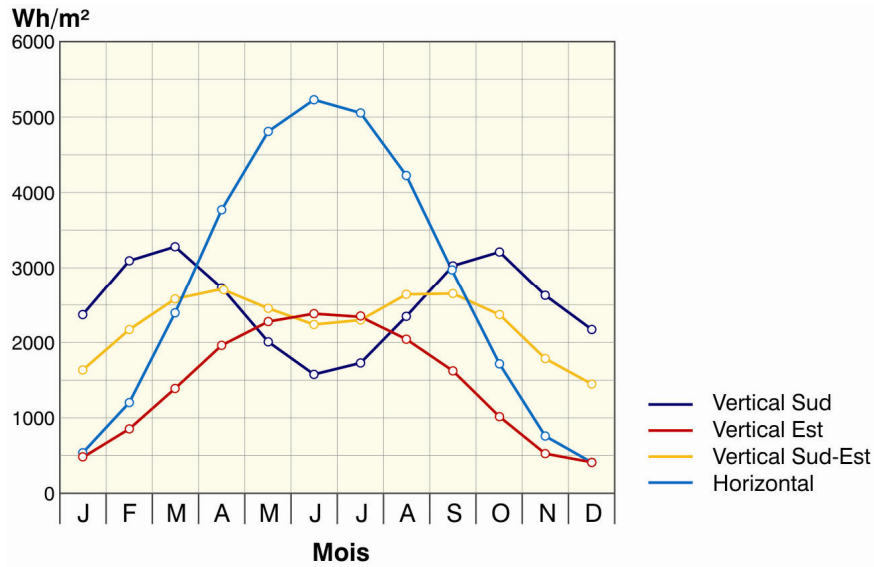
De plus, une étude réalisée en grande Bretagne montre que tant que l'angle d'obstruction solaire moyen reste inférieur à 30°, la consommation énergétique d'une maison située en ville est plus faible que celle d'une habitation fortement isolée mais en site totalement dégagé, quelque soit l'orientation. Par contre, si l'angle d'obstruction solaire moyen dépasse les 30°, la consommation énergétique des bâtiments sera supérieure dans le cas urbain (Steemers 2003).

Vu que la latitude de la Belgique est proche de celle de la grande Bretagne, nous pouvons affirmer qu'il est souhaitable en Belgique que les angles d'obstruction verticaux ne dépassent pas 25° à 30°, c'est-à-dire $H/W \leq 0.5$. Mais l'idéal reste d'avoir au moins la distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire pour le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments, ce qui correspond à un angle de 15.8° à Bruxelles, soit $H/W = 0.3$. **Nous pouvons donc conclure que l'accès au soleil est un critère critique au niveau de l'urbanisme en Belgique.**



Pour profiter des gains solaires et de la lumière naturelle dans les bâtiments, l'orientation des façades est importante. Le graphe ci-dessous montre les gains solaires reçus par ciel serein en Belgique à travers un double vitrage vertical, sans obstruction du contexte, orienté :

- au sud (courbe bleu foncé),
- à l'est/ouest (courbe rose),
- au sud-est /sud-ouest (courbe jaune),
- et pour un double vitrage horizontal, ce qui correspond à un éclairage zénithal (courbe turquoise) et approximativement à l'ensoleillement du sol de l'espace public urbain.

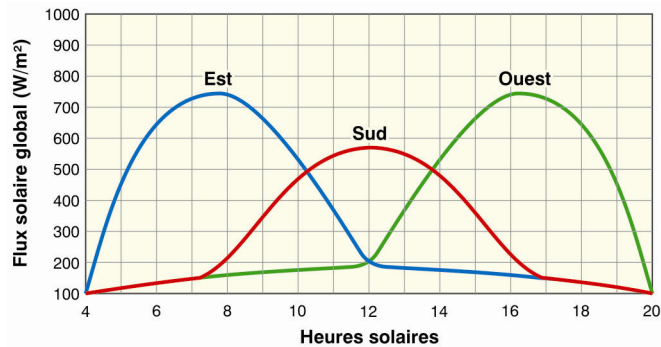


Eclairages énergétiques d'une surface pour différentes orientations. (Architecture et Climat 2004).

Ainsi, une fenêtre orientée à l'est reçoit très peu de soleil en hiver, un peu plus en mi-saison et un maximum en été. Une fenêtre orientée au sud reçoit globalement plus de soleil qu'une fenêtre orientée à l'est. De plus cette énergie solaire reçue est mieux répartie, avec un maximum en mi-saison, un peu moins en hiver, et encore moins en été.

L'orientation des façades induit également le cycle journalier d'ensoleillement direct possible à l'intérieur des bâtiments. Les pièces orientées au nord bénéficient toute l'année d'une lumière égale et du rayonnement solaire diffus. Les pièces orientées à l'est bénéficient du soleil le matin mais la lumière est difficile à maîtriser car les rayons sont bas sur l'horizon. L'exposition solaire y est faible en hiver et moyenne en mi-saison mais, en été, elle est supérieure à l'orientation sud, ce qui est peu intéressant. Les pièces orientées à l'ouest bénéficient du soleil en fin d'après-midi. Les rayons bas sur l'horizon y créent une possibilité d'inconfort visuel par éblouissement et une exposition aux surchauffes en été. Les surfaces sud reçoivent globalement un plus grand ensoleillement que les surfaces est et ouest mais surtout cet ensoleillement est mieux réparti sur l'année. Les pièces orientées au sud bénéficient d'une lumière plus facile à contrôler et d'un ensoleillement maximal en hiver et minimal en été. En effet, en hiver, le soleil bas ($\pm 17^\circ$) pénètre profondément dans la maison tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée ($\pm 60^\circ$) et la pénétration du soleil est donc moins profonde. Le sud est l'orientation qui permet le meilleur contrôle passif de l'ensoleillement. La figure ci-dessous représente le flux solaire instantané traversant un double vitrage par une journée

ensoleillée du mois de juillet, en fonction de l'orientation de la fenêtre, en Watts par m² de vitrage, sans obstruction du contexte construit.

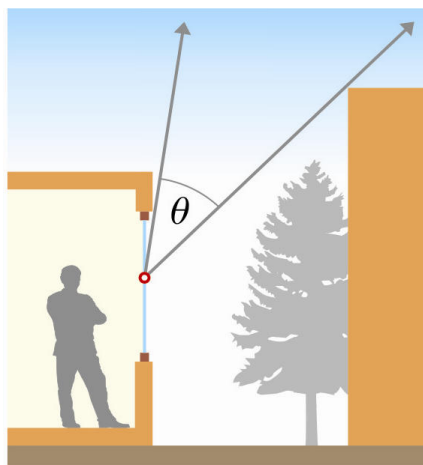


(Architecture et Climat 1998).

En climat tempéré, il faut offrir la possibilité aux façades orientées au sud d'être ensoleillées pendant l'hiver pour profiter des gains solaires et diminuer les consommations d'énergie tout en apportant de la lumière naturelle dans les bâtiments. Il est donc judicieux de concevoir des bâtiments qui maximisent leurs surfaces d'exposition au sud, tout en ne limitant pas l'accès au soleil des autres. Il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments. Quand c'est possible, il est conseillé de placer les bâtiments les plus élevés au nord. Si les rues se développent selon l'axe E-O, il est possible de maximiser la longueur des façades sud, tant au niveau des rues que des intérieurs d'îlots.

En plus de la disponibilité à l'ensoleillement qui détermine les gains solaires potentiels, la lumière naturelle est aussi une source d'énergie de par sa fonction d'éclairage naturel. Elle permet de réduire les besoins en éclairage artificiels des bâtiments pendant la journée.

L'éclairage naturel des bâtiments dépend en grande partie de sa conception architecturale : taille et position des fenêtres, facteurs de réflexion des matériaux intérieurs, choix du type de vitrage,... mais il dépend en premier lieu des obstructions extérieures de l'environnement qui permettent de profiter de la lumière naturelle ou limitent son usage. Ainsi, par ciel couvert, la quantité de lumière naturelle qui traverse une fenêtre est proportionnelle à l'angle de vue du ciel depuis le centre de cette fenêtre dans un plan vertical.



L'angle de vue du ciel. (Littlefair & al. 2000).

Pour profiter au maximum de la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments, il importe de ne pas négliger le facteur de réflexion des surfaces extérieures environnant le bâtiment. En effet, des surfaces claires et réfléchissantes augmentent la quantité de lumière qui peut pénétrer dans le bâtiment. Des surfaces réfléchissantes au sol contribuent à capter davantage de lumière par ciel couvert. Les façades sud, qui présentent la meilleure disponibilité au soleil, pourraient être de préférence blanches ou de couleur claire pour renvoyer la lumière en face puisque les surfaces nord sont souvent en manque de soleil.



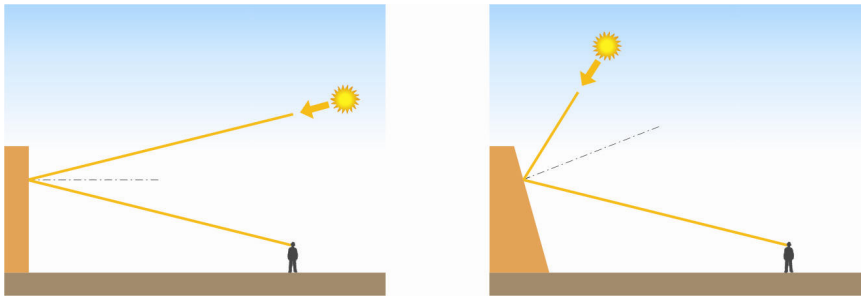
(Photo : S. Reiter).

Il faut toutefois faire attention aux surfaces très réfléchissantes orientées au sud : elles peuvent causer de **l'éblouissement**. Des problèmes peuvent donc apparaître lorsqu'un bâtiment sud est couvert de vitrage réfléchissant. L'emploi de matériaux réfléchissants peut également influencer **l'exposition effective d'un bâtiment**. Un édifice orienté au nord et doté de larges vitrages clairs pour tirer parti de la lumière naturelle peut se trouver dans une situation sud si on construit en face de lui un bâtiment équipé de vitrages réfléchissants, précisément pour se protéger de l'ensoleillement. A l'évidence, les conditions de confort du premier bâtiment sont profondément modifiées par la construction du second.



(Photo : S. Reiter).

Les surfaces vitrées verticales avec un vitrage clair ne causent un problème d'éblouissement que lorsque le soleil est très bas (lever et coucher du soleil). Par contre, lorsque la façade est inclinée, des problèmes peuvent se produire même lorsque le soleil est haut dans le ciel. Les façades vitrées qui sont inclinées de plus de 35° par rapport à la verticale devraient faire l'objet d'une attention particulière par rapport aux risques d'éblouissement.

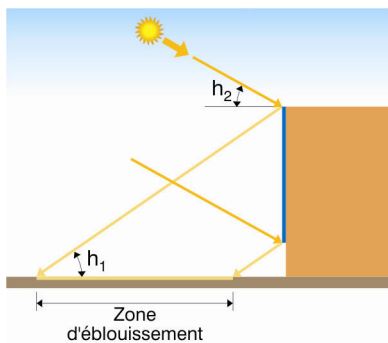


Risques d'éblouissement en fonction de l'inclinaison d'un vitrage (Littlefair & al. 2000).

Si la hauteur du soleil est h_2 et son azimut pour une façade verticale est ϕ_2 , les rayons réfléchis auront une altitude h_1 et l'azimut ϕ_1 qui sont donnés par les équations suivantes et représentés dans le graphe ci-dessous (Littlefair & al. 2000).

$$h_1 = -h_2$$

$$\phi_1 = -\phi_2$$



Zone d'éblouissement (Littlefair & al. 2000).

Si on incline la façade vers l'arrière depuis la verticale, d'un angle égal à s , alors les équations ci-dessus se réécrivent :

$$\sin(h_2) = (\sin(2s) \cos(h_1) \cos(\phi_1)) - (\cos(2s) \sin(h_1))$$

$$\tan \phi_2 = -\phi_1 / (\cos(2s) \cos(\phi_1) + (\cos(2s) \cos(\phi_1) + \sin(2s) \tan(h_1))$$

Si ces équations sont appliquées pour un certain nombre de points d'une hauteur et d'azimut connus h_1 et ϕ_1 à partir de la façade, alors les points h_2 et ϕ_2 peuvent être calculés pour déterminer les limites de l'effet d'éblouissement. Ces points peuvent être alors dessinés sur un diagramme solaire pour donner les moments de la journée et de l'année pour lesquels les rayons lumineux poseront des problèmes.

Ainsi, les vitrages réfléchissants limitent la pénétration de gains solaires à l'intérieur des bâtiments mais souvent au détriment des conditions de confort extérieur... Il est donc important de rappeler que l'architecture durable tient compte du contexte dans lequel elle s'inscrit.

Se protéger de la lumière naturelle consiste à arrêter partiellement ou totalement le rayonnement solaire lorsqu'il présente des caractéristiques néfastes. Pour le confort visuel des citoyens, il s'agit essentiellement de se protéger de l'éblouissement. Pour leur confort thermique, il peut être utile de créer des zones d'ombres sur les places en été. Ainsi, l'ensoleillement des espaces publics devrait être maximal en hiver mais il est indispensable d'ombrager partiellement les places en été. Pendant la saison chaude, les surfaces ensoleillées ne devraient pas dépasser 80% de la superficie totale des espaces publics de détente.

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée; citons, par exemple, la végétation, les auvents et les écrans mobiles.

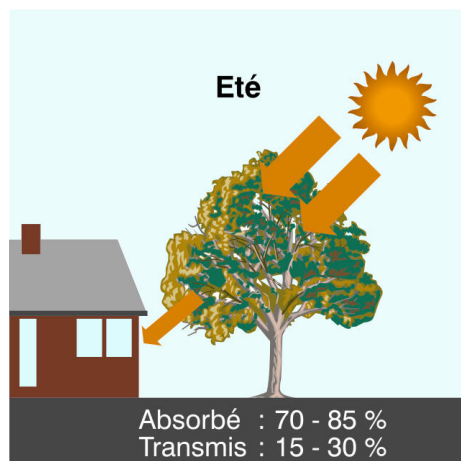
La végétation se distingue des autres écrans parce qu'elle peut être saisonnière, ce qui est le cas des arbres à feuilles caduques, et que par ailleurs elle ne possède qu'une opacité partielle. Elle se contente de filtrer la radiation lumineuse plutôt que de l'arrêter.



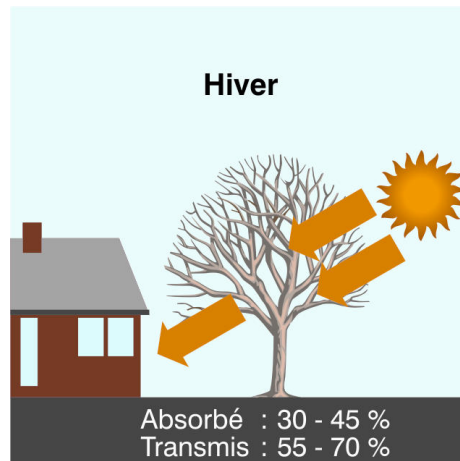
(Photo : S. Reiter).

Les plantes à feuilles caduques apportent une protection naturellement variable. En été, le feuillage fournit un ombrage; en hiver, la chute des feuilles fait profiter les bâtiments des apports gratuits du soleil. En général, on recherchera des essences à feuilles caduques qui présentent peu de branchage pour avoir un ombrage minimum en hiver mais avec un feuillage dense en été. Les arbres à feuilles caduques sont un très bon système de protection solaire pour les orientations est et sud-est ainsi que pour les orientations ouest et sud-ouest. En effet, pour ces orientations, le soleil est bas en début de matinée et en fin d'après-midi.

Notons que tous les arbres laissent passer une certaine partie du rayonnement solaire à travers leur feuillage. Et tous les arbres donnent un certain ombrage, même sans feuilles, de par leur tronc et leurs branches. Par contre, les différentes espèces d'arbres interceptent le rayonnement solaire selon différentes intensités, et différentes temporalités sur l'année.



(Reiter & De Herde 2001).



(Reiter & De Herde 2001).

Les considérations principales dans la conception de plantations sont le type d'espèce, la vitesse de croissance et la localisation. Les espèces locales ont généralement une résistance plus forte aux conditions climatiques locales, nécessitant une maintenance plus faible que les espèces exotiques. Les caractéristiques de plantes qui peuvent significativement affecter leur contribution à l'ombrage sont :

- le temps mis pour atteindre une taille suffisante
- son diamètre et sa hauteur, qui influencent la distance entre arbres ou entre un arbre et un bâtiment
- la durée de la feuillaison
- la résistance à la pollution: des espèces durables sont nécessaires en zone urbaine pour éviter la mort prématurée des plantes.

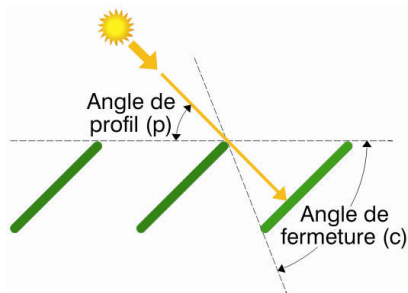
Les arbres à moyenne ou haute tige permettent la vue durant toute l'année, l'ombre obtenue est fonction de la distance entre la plantation et l'élément à ombrer, de la hauteur de la tige et de la hauteur de l'arbre. Cependant, il faut attendre un grand nombre d'années avant qu'ils n'atteignent la taille souhaitée. Dans le cas des arbustes, des arbres à basse tige ou des plantes retombantes, la vue est pratiquement inexistante durant la période estivale mais l'ombrage est facilement réalisé et son efficacité est rapide.

Une alternative efficace de protection végétale est la réalisation de pergolas ou de tonnelles. Celles-ci peuvent être créées avec des plantes grimpantes à feuilles caduques, comme par exemple la vigne, la vigne vierge, le chèvrefeuille et la glycine, ou avec des plantes annuelles à croissance rapide telles que les pois de senteur ou les capucines.



Anacapri (Architecture et Climat 2004).

Pour fournir de l'ombrage à partir d'un auvent formé de lattes, il faut respecter les angles indiqués dans le schéma ci-dessous. Une protection dont les lattes sont orientées vers le sud et s'allongent d'est en ouest fournit un ombrage tout au long de la journée alors que cette protection tournée vers l'est ou vers l'ouest ne fournit qu'un ombrage temporaire d'une demi-journée (Brown & DeKay 2001).



(Brown & DeKay 2001).

Les **arcades** sont aussi un dispositif qui permet de se protéger du soleil quand cela est nécessaire. Ainsi, elles peuvent être orientées et dimensionnées de façon à recevoir le soleil d'hiver tout en créant un ombrage bienvenu en été.



(Littlefair et al. 2000)

Evaluer le rayonnement solaire en zone urbaine

Il y a trois types de méthodes d'évaluation du rayonnement solaire en zone urbaine :

- les méthodes simplifiées,
- les simulations informatiques,
- les mesures sur modèle réduit, sous ciel réel ou sous ciel artificiel.

1/ Les méthodes simplifiées

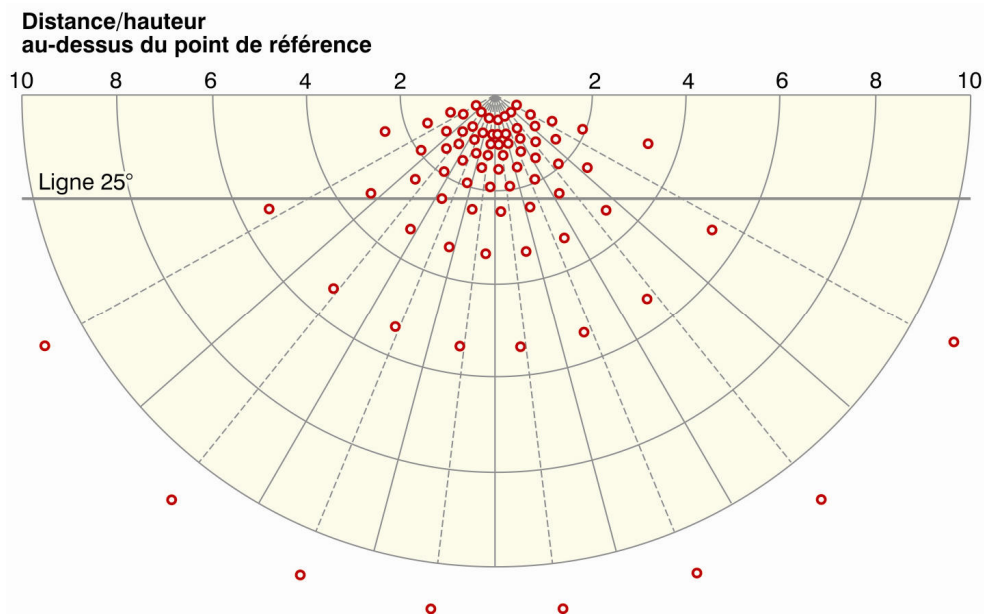
L'avantage des méthodes simplifiées est la grande rapidité avec laquelle on peut obtenir des résultats. Toutefois, les logiciels permettant de visualiser et d'évaluer le rayonnement solaire en milieu urbain sont assez faciles d'accès et peuvent eux aussi donner des résultats assez rapidement. Citons toutefois quelques méthodes simplifiées qui nous semblent intéressantes.

Le BRE a produit un ensemble de graphes simples et pratiques pour aider les concepteurs à évaluer l'accès au soleil et à la lumière naturelle dans les zones urbaines construites. L'outil de conception complet comprend des indicateurs localisés pour huit latitudes réparties à travers toute l'Europe et un texte explicatif (Littlefair & Aizlewood 1999). Ces outils sont très pratiques pour évaluer le potentiel d'un site du point de vue du rayonnement solaire ainsi que pour comparer différentes options de conception. Les différents lieux de référence pour ces indicateurs sont repris dans le tableau ci-dessous.

Latitude (°N)	Lieu de référence
60	Bergen
56	Edinburgh
53.5	Manchester
51	Londres
48	Weihenstephan
45	Lyon
42	Rome
38	Athènes

Ces outils sont au nombre de quatre : l'indicateur de lumière du ciel, l'indicateur de la disponibilité à l'ensoleillement, l'indicateur de la course du soleil et l'indicateur des gains solaires. Ces indicateurs forment une méthode manuelle relativement rapide pour déterminer l'impact de constructions et obstacles divers sur la lumière naturelle, l'ensoleillement et les gains solaires d'un bâtiment ou d'un espace public. L'utilisation de ces indicateurs nécessite une mise à l'échelle du plan du site analysé mais cette transformation est identique pour tous les indicateurs et le même plan peut donc être réutilisé.

L'indicateur de lumière du ciel sert à trouver la composante verticale du ciel (%), c'est-à-dire le rapport entre l'éclairement direct du ciel tombant sur un mur vertical à un point de référence et l'éclairement horizontal simultané sous un ciel non obstrué par des bâtiments. La valeur maximale est d'environ 40% pour un mur vertical sans obstruction. Cet indicateur de lumière du ciel présente 80 croix dont chacune correspond à 0.5% de la composante verticale du ciel. Cet indicateur est donné graphiquement ci-dessous ; il est valable pour toutes les latitudes et peut donc être utilisé n'importe où. Cet indicateur est utilisé en plaçant la partie droite le long de la façade à analyser et le centre au niveau du point de référence.



Indicateur de la lumière du ciel (Littlefair & al. 2000).

L'indicateur de la disponibilité à l'ensoleillement conçu par le BRE permet de calculer les heures d'ensoleillement reçues sur une façade. Cet indicateur dépend de la latitude.

L'indicateur de la course du soleil sert à trouver les moments de la journée et de l'année pendant lesquelles la lumière solaire est disponible sur une fenêtre. Les courbes de cet indicateur sont les courses du soleil pour le 21^{ème} jour de chaque mois. Chaque ligne représentant la course du soleil est divisée en heures solaires. Cet indicateur dépend de la latitude.

L'indicateur de gains solaires sert à trouver le rayonnement solaire incident sur une fenêtre verticale orientée au sud ou dans un angle de 30° par rapport au sud, pendant la saison de chauffage (octobre à avril), avec et sans obstruction. Chaque

point sur cet indicateur représente 1% des gains solaires obtenus pendant la période de chauffage des bâtiments. Cet indicateur dépend de la latitude.

Comme outil d'évaluation couramment employé pour évaluer les ombrages dans un espace public, on peut utiliser des diagrammes de la course solaire superposés avec des projections stéréographiques des obstructions environnantes qui évaluent l'accès au soleil en des points déterminés de l'espace public (Littlefair & al. 2000).

La projection stéréographique est une représentation de l'hémisphère entière de la voûte du ciel sous forme d'un disque circulaire avec son centre qui correspond au zénith (soit la verticale au-dessus du lieu), et son périmètre qui représente l'horizon. La vue résultante correspond à photographie fish-eye à 180° prise par un photographe couché sur son dos. En conception bioclimatique, la projection stéréographique est souvent employée comme un outil commode pour évaluer les effets d'ombrage. Ceci se fait en superposant le diagramme de la course solaire avec les obstructions dues aux bâtiments environnants. Toutefois, pour étudier l'intégralité d'un espace ouvert, ces projections ont le grand désavantage de varier considérablement d'un point à l'autre de cet espace urbain.

Le diagramme stéréographique de la course du soleil pour la Belgique est donné dans le schéma ci-dessous.

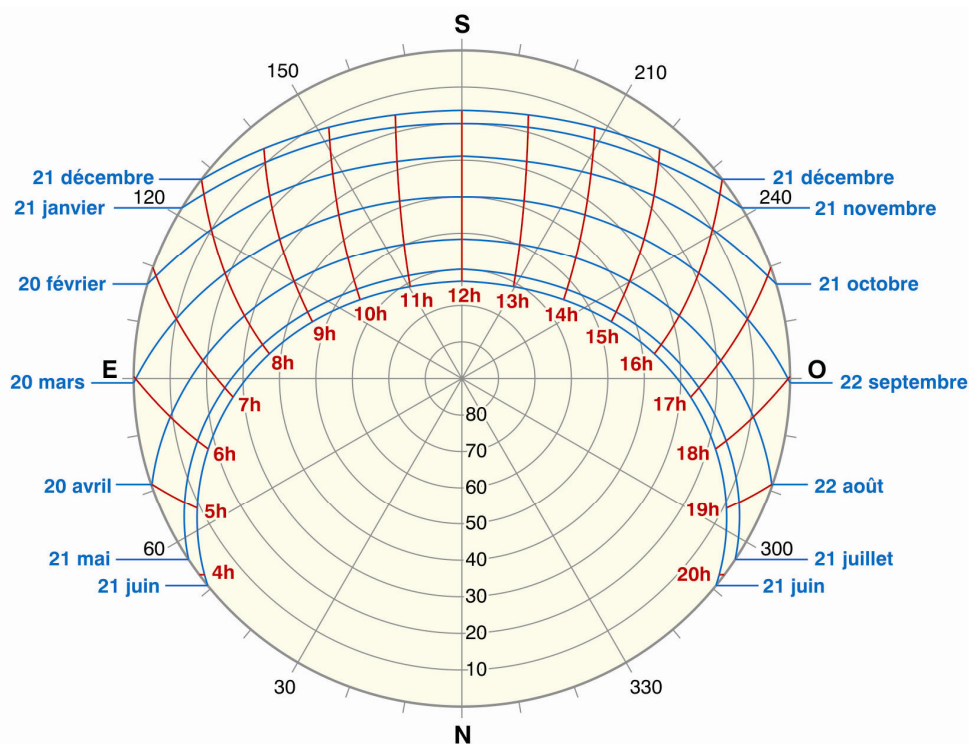


Diagramme stéréographique de la course solaire à Bruxelles (Lat :50.2 ; long :4.53)

Les figures ci-dessous montrent à gauche le plan de l'espace public considéré (en vert) et à droite une projection stéréographique depuis un point de vue unique situé dans l'espace ouvert. Les éléments noirs correspondent aux obstructions par rapport à l'éclairage naturel créées par les bâtiments entourant la place. Cette image correspond donc à une évaluation locale à partir d'un point de vue spécifique.



(Compagnon & Goyette-Pernot 2004).



(Compagnon & Goyette-Pernot 2004).

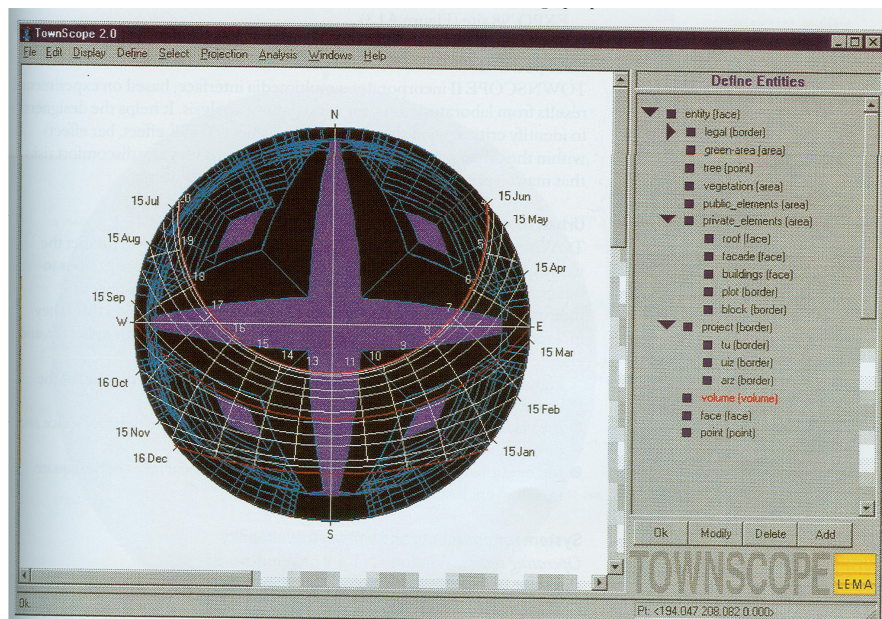
Cependant, les logiciels habituellement utilisés par les architectes tels que Autocad permettent déjà d'analyser facilement les zones d'ombrage en fonction de la course du soleil.

2/ Les simulations informatiques

Pour évaluer le rayonnement solaire en milieu urbain, il est nécessaire d'utiliser un logiciel qui tienne compte des composantes directes et diffuse du rayonnement solaire.

TOWNSCOPE et SOLENE sont deux logiciels qui permettent d'étudier le rayonnement solaire énergétique et lumineux en milieu urbain. SHADOWPACK et ECOTECT permettent aussi d'évaluer l'ensoleillement énergétique des façades et les ombres générées dans les espaces publics.

Nous recommandons TOWNSCOPE, qui est un outil d'analyse précis et rapide du rayonnement solaire en milieu urbain, dans ses aspects thermiques (rayonnement solaire et rayonnement de grande longueur d'onde) et visuels (éclairage naturel, projections stéréographiques, facteur de vue du ciel, ...) Il permet de comparer facilement différentes options de conception. Ce logiciel a été développé par le LEMA de l'université de Liège (Belgique).



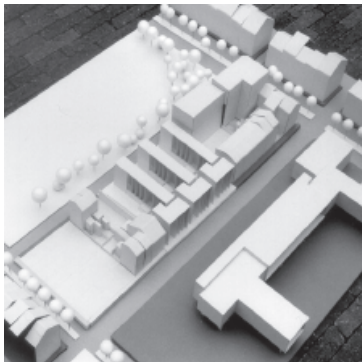
(Littlefair & al. 2000).

3/Les maquettes sous ciel réel ou sous ciel et soleil artificiels

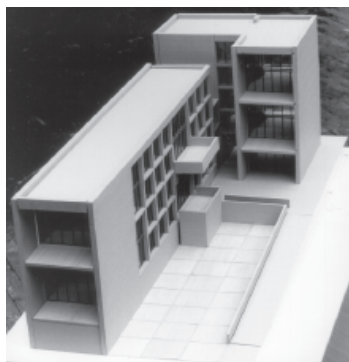
Une des manières d'évaluer précisément l'éclairage et l'ensoleillement qui atteint un site est de construire une maquette et de la tester sous le ciel réel ou sous un ciel et un soleil artificiels. La maquette elle-même devrait comporter tous les bâtiments qui créent une obstruction par rapport au soleil sur le site évalué.

Contrairement aux modèles thermiques et acoustiques, les modèles physiques étudiant la lumière ne nécessitent aucune correction d'échelle et peuvent donner des résultats très précis. En effet, la longueur d'onde de la lumière visible est si courte en comparaison des dimensions d'un modèle réduit que son comportement en est très peu affecté. En tenant compte de la perception visuelle humaine, on ne discerne aucune différence visuelle entre la réalité et un modèle réduit idéal.

La maquette d'une pièce ayant exactement la même géométrie et des surfaces de coefficients de réflexion et de transmission lumineuse identiques à ceux des surfaces réelles fournira la même quantité et la même qualité de lumière que celle réellement présente dans un lieu. Si, en plus, les couleurs utilisées dans le modèle correspondent aux vraies couleurs de la pièce, l'impression visuelle du modèle sera très proche de la perception du local réel.

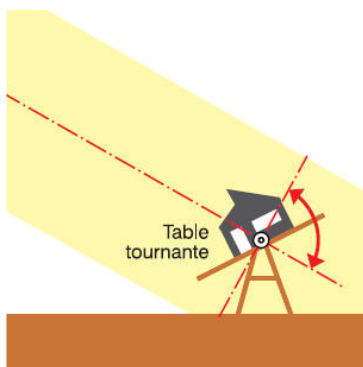


(Reiter & De Herde 2001).



(Reiter & De Herde 2001).

Pour l'analyse du comportement d'un bâtiment sous le rayonnement soleil direct, les différentes inclinaisons du soleil peuvent être obtenues par une modification de l'orientation et de l'inclinaison du bâtiment de manière à ce que l'incidence des rayons solaires corresponde à la hauteur et à l'azimut du soleil du moment de l'année à étudier. La figure ci-contre montre un exemple d'une table inclinable qui permet d'atteindre ce but. Il faut toutefois remarquer qu'une telle inclinaison de la maquette expose celle-ci à des surfaces de ciel et de sol différentes par rapport à sa position horizontale. En pratique, cette différence influence peu l'éclairage à l'intérieur du modèle réduit car les luminances du ciel clair et du sol éclairé directement par le soleil sont fort proches.



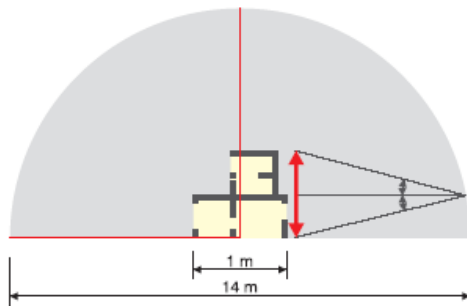
(Reiter & De Herde 2001).

L'inconvénient de tester un modèle réduit sous ciel réel est de dépendre des conditions météorologiques et de ne pas connaître les conditions exactes sous lesquelles la maquette est testée. Toutefois, les résultats sont généralement largement assez précis pour évaluer la qualité lumineuse des espaces publics urbains.

Le ciel artificiel est un dispositif qui a pour but de reproduire la distribution des luminances de la voûte céleste. L'avantage majeur d'un ciel artificiel réside dans son environnement lumineux très stable, ce qui assure des conditions lumineuses identiques pendant les différentes mesures et permet donc de les comparer très facilement entre elles. De plus, vu que la distribution lumineuse du ciel artificiel est connue et contrôlée, il est possible de tirer des conclusions plus précises que sous le ciel réel.

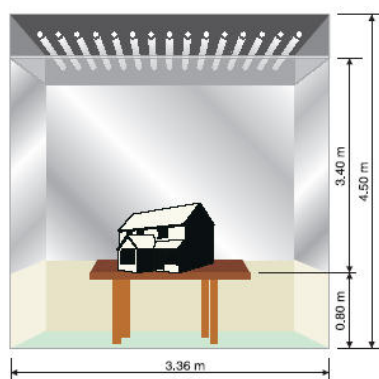
Le ciel artificiel est utilisé pour tester uniquement les contributions lumineuses de la voûte céleste. Pour déterminer l'impact du rayonnement solaire direct, il faut se servir d'un soleil artificiel.

Lorsque l'étude du modèle réduit est réalisée sous un ciel artificiel, les dimensions de la maquette doivent tenir compte de la taille du ciel afin d'éviter des erreurs de parallaxe. Signalons également que les photographies couleurs exécutées dans une maquette sous ciel artificiel ne reproduisent pas précisément les couleurs vues sous ciel réel car les lampes utilisées pour simuler le ciel influencent la perception des couleurs. Néanmoins, le ciel artificiel est un outil remarquable pour la prédétermination quantitative de la lumière naturelle.

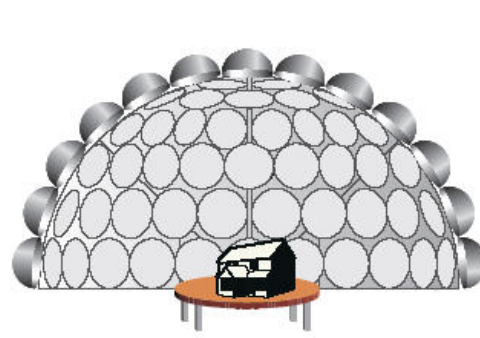


(Reiter & De Herde 2001).

Il existe plusieurs types de ciels artificiels: les configurations principales sont le ciel à miroirs (dessin de gauche) et le ciel de type dôme (dessin de droite).



Ciel à miroirs
(Reiter & De Herde 2001).



Ciel de type dôme
(Reiter & De Herde 2001).

Le ciel à miroirs est constitué d'une boîte dont les murs sont recouverts de miroirs et dont le plafond est un diffuseur de lumière. Il crée donc un ciel dont l'horizon 'infini' provient de multiples interrélflexions de la lumière sur les miroirs. Comme une partie de la lumière est absorbée à chaque réflexion, cette configuration tend à approximer la lumière naturelle d'un ciel couvert puisque celui-ci est plus lumineux au zénith qu'à l'horizon. La distribution lumineuse précise du ciel est déterminée par le rapport de la largeur sur la hauteur de la boîte. Le ciel à miroirs ne peut malheureusement simuler qu'un seul type de ciel: le ciel couvert. Il n'est pas possible d'intégrer l'étude du rayonnement solaire direct dans un ciel à miroirs. Les photos ci-dessous montrent l'extérieur (à gauche) et l'intérieur (à droite) du ciel à miroirs du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) à Limelette (Belgique).

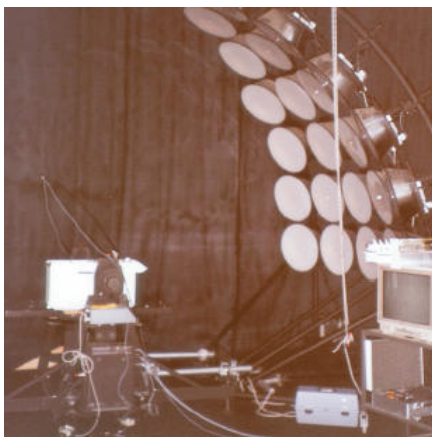


(Reiter & De Herde 2001).



(Photo : M. Bodart).

Il existe un grand nombre de ciels de type dôme. Le diamètre des différents ciels artificiels hémisphériques varie entre 3m et 14m. Certains d'entre eux sont constitués par des lampes situées au pied d'un hémisphère en matériau réfléchissant. D'autres sont formés d'un ensemble de lampes positionnées sur la totalité de la voûte. Leurs inconvénients sont généralement leur consommation électrique importante, le prix de réalisation souvent élevé, les problèmes de maintenance et la difficulté de calibration du fait du grand nombre de sources lumineuses.



Ciel artificiel de l'EPFL (Lausanne)
(Reiter & De Herde 2001).

Au Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) à Limelette (Belgique), un ciel de type hémisphérique formé d'une seule lampe a été réalisé. Les avantages de ce type de ciel hémisphérique à une lampe par rapport aux autres ciels de type dôme sont: la calibration de la lampe très facile, rapide et précise

puisqu'il suffit de mesurer une lampe et son prix nettement moins coûteux que celui de la majorité des ciels à dôme. L'inconvénient est son impossibilité de visualiser ou de mesurer la luminosité instantanément dans la maquette. Les résultats visuels, si précieux pour les architectes, sont difficiles à obtenir. Le dessin ci-dessous montre le fonctionnement de ce ciel artificiel.

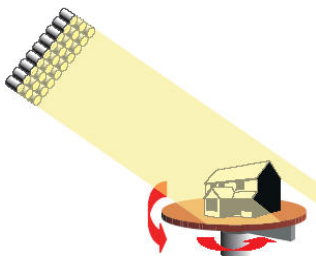


(Reiter & De Herde 2001).

Le ciel à miroirs est conçu pour les architectes et spécialement pour les étudiants en architecture. Il donne rapidement une impression de la lumière naturelle à l'intérieur d'un bâtiment, sous un ciel couvert CIE. Il est donc aisé de comparer différentes alternatives du point de vue de la lumière naturelle sous ce ciel artificiel. C'est le type de ciel artificiel le meilleur marché et il est, en outre, facile à construire. Le ciel de type dôme à une lampe est le plus précis du point de vue scientifique. Il sera davantage utilisé dans un but de recherche. Il peut reproduire tous les types de ciels standards ou statistiques pour des coûts de construction, de maintenance et de fonctionnement faibles. Il est idéal pour obtenir des résultats très précis du comportement de la lumière sous n'importe quel type de ciel.

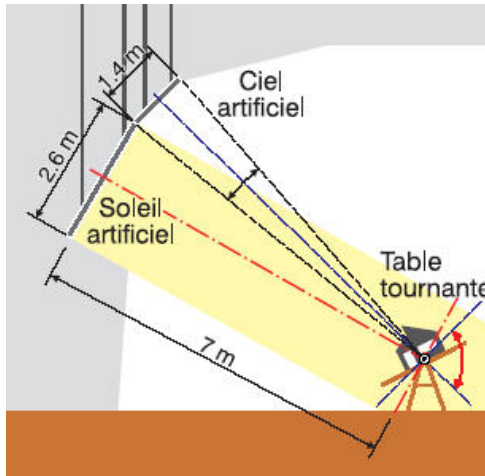
Un soleil artificiel est un dispositif destiné à simuler les caractéristiques des rayons lumineux provenant directement du soleil. La spécificité de l'éclairage naturel est sa variabilité, liée à la modification permanente de la position du soleil et de la nébulosité. L'utilité d'un soleil artificiel est évidente: la lumière naturelle directe est responsable de la plupart des situations critiques observées sur le plan du confort visuel (éblouissement, effet de protections solaires, ...). L'étude de la composante directe de la lumière se révèle donc indispensable. Enfin, le soleil artificiel permet aussi d'étudier la dynamique de la lumière solaire à l'intérieur du projet. Il offre donc la possibilité de visualiser, par une observation directe, l'impact du rayonnement solaire direct.

En Belgique, au CSTC, il y a un soleil artificiel, formé à partir d'un ensemble de lampes halogènes de faible angle d'ouverture. Ce soleil artificiel peut reproduire toutes les positions du soleil grâce à une table tournante. Il permet de faire des mesures précises et de déduire une évaluation des prestations annuelles de l'éclairage solaire direct sur un modèle réduit. L'image ci-dessous montre le fonctionnement du soleil artificiel du CSTC.



(Reiter & De Herde 2001).

Le grand intérêt du soleil artificiel est qu'on peut le combiner avec le ciel hémisphérique à une lampe pour obtenir l'éclairage et l'ensoleillement pour tout type de ciel (serein, couvert,...). L'image et les photos ci-dessous représentent la combinaison du ciel artificiel à une lampe et du soleil artificiel qui se trouvent au CSTC.



(Reiter & De Herde 2001).



Ciel et soleil artificiels
(Photo : M. Bodart)

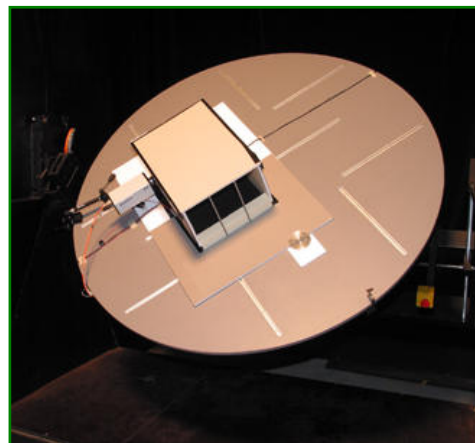


Table tournante
(Photo : M. Bodart)

Le ciel à miroirs, le ciel hémisphérique à une lampe et le soleil artificiel qui se trouvent au CSTC ont été développés au cours du projet Zoeklicht dans le cadre du programme de recherche VLIET-bis, qui a rassemblé les équipes de recherche du CSTC (Division Physique du Bâtiment et Climat Intérieur), de WenK (Département Architectuur St-Lucas-Campus Gent) et de l'UCL (Architecture et Climat).

Le CSTC possède un quatrième outil pour évaluer l'éclairage naturel sur modèle réduit sous ciel artificiel : le soleil mécanique. Le soleil mécanique offre une observation directe de l'ensoleillement sur une maquette. Il s'agit d'un outil didactique permettant une vision immédiate de la situation par rapport au rayonnement solaire direct. Ce nouvel outil de simulation de l'ensoleillement direct sur modèle réduit, le soleil mécanique, reflète fidèlement notre perception du mouvement du soleil autour d'un site construit. Il met donc en évidence les cycles journaliers et saisonniers de l'ensoleillement d'un espace public ou d'un bâtiment testé en modèle réduit.

Afin d'évaluer ce mouvement, une installation mécanique permettant de déplacer une source lumineuse autour d'un modèle réduit en respectant exactement le mouvement du soleil a été mise au point. Une simulation de l'ensoleillement direct peut être effectuée pour toute latitude et pour toute date choisie par simple déplacement d'éléments mécaniques (deux chariots le long d'un arc de cercle). Cette adaptation nécessite moins d'une minute, ce qui permet d'évaluer rapidement le comportement d'une morphologie construite en fonction des modifications journalières et saisonnières. L'emploi de ce simulateur permet de visualiser les éclaircissements et les ombrages sur un modèle réduit de masse (échelle 1/200) ou de détail (échelle 1/20) de manière pratiquement instantanée et dynamique (mouvement du soleil sur une journée).

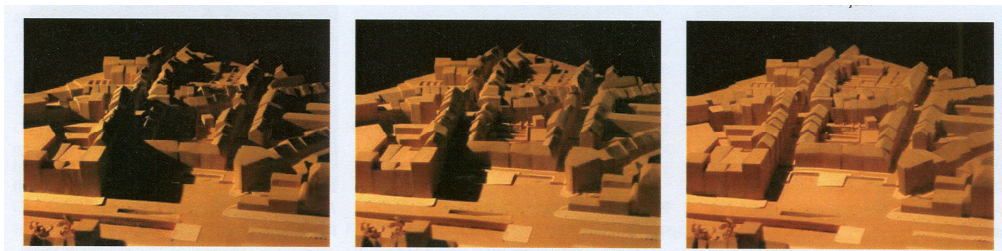
Les éléments principaux constituant le soleil mécanique, numérotés sur la photo ci-dessous, sont :

- 1/ une source lumineuse simulant le soleil,
 - 2/ un premier arc de cercle, fixe, sur lequel coulisse un petit chariot dont on peut maintenir la position par un système d'arrêt, permettant ainsi de fixer la latitude considérée pour la simulation,
 - 3/ un deuxième arc de cercle, mobile, sur lequel se déplace un deuxième chariot muni d'une source lumineuse simulant le soleil
 - 4/ une structure de soutien sur laquelle repose le bras mobile
 - 5/ un axe pivot permettant la rotation du bras mobile par rapport à la structure de soutien
 - 6/ un câble reliant le premier chariot au second et dont on peut régler la longueur, afin de fixer la date (saison) pour laquelle la simulation est réalisée
- Un contrepoids permettant d'alléger le poids apparent de la source lumineuse.



(Bodart 2007)

Les photos ci-dessous présentent les vues de l'ensoleillement et des ombrages à midi (solaire) sur un modèle réduit de masse situé à Uccle (Bruxelles) le 21 décembre (à gauche), le 21 mars (au milieu) et le 21 juin (à droite).



21/12

21/03

21/06

(Photos : Bodart 2007)

3.2.4 La modification des mouvements d'air en milieu urbain

Les villes modifient fortement les conditions de la circulation de l'air. Les espaces urbanisés constituent des surfaces de forte rugosité. Celle-ci réduit, globalement, la vitesse du vent.



(Photo : S. Reiter).

La couche limite atmosphérique est la couche d'air proche du sol dans laquelle le flux du vent est affecté par les propriétés du terrain. Cette couche limite augmente au dessus des villes. Dans la couche limite, le vent est ralenti par les forces de friction créées par le terrain. Plus la rugosité de la surface du sol est importante, plus le vent est ralenti dans la couche limite qui le couvre. La couche limite atmosphérique située au-dessus d'une urbanisation peut être définie en trois zones :

- la canopée urbaine, qui s'étend de la surface du sol jusqu'à la hauteur moyenne des bâtiments,
- le dôme urbain qui s'étend du toit des bâtiments jusqu'à deux ou trois fois la hauteur des bâtiments.
- Le reste de la couche limite atmosphérique où le vent n'est plus affecté par les détails de la surface mais seulement par sa longueur de rugosité.

L'augmentation de la rugosité, due à la présence d'une densité de bâti et de bâtiments élevés, cause inversement une augmentation de la turbulence. La direction des vents régionaux peut aussi être altérée.

En outre, localement, il peut se produire des effets d'accélération du vent ou de fortes turbulences liées à certaines configurations du bâti plus habituelles en milieu urbain, telles que les bâtiments très élevés. Il faut signaler que la présence de bâtiments de grande hauteur est le facteur principal d'inconfort lié au vent pour les piétons. L'étude du confort lié au vent en site urbain est un sujet complexe mais extrêmement important pour la qualité des espaces publics.

Les villes modernes présentent de plus en plus souvent des constructions très élevées et des formes audacieuses qui peuvent entraîner des problèmes importants liés au vent autour de ces édifices. Ainsi, de nouvelles législations concernant l'impact des bâtiments sur les mouvements d'air en site urbain commencent à apparaître dans différents pays, dans le but de garantir le confort et la sécurité des piétons dans les espaces publics.

Un bâtiment substantiellement plus grand que son entourage crée une déflexion du vent à la fois horizontalement et verticalement. Un effet important de cette déflexion est de causer un accroissement important de la vitesse moyenne du vent au niveau piéton autour de ce bâtiment.



(Photo : S. Reiter).

Le vent influence la dispersion des polluants et la consommation d'énergie des bâtiments. L'estimation de la vitesse du vent en ville est vitale pour la conception de bâtiments refroidis naturellement. La diminution de la vitesse du vent peut aggraver les inconvénients de l'îlot de chaleur en période de surchauffes. En outre, le vent affecte la température, la vitesse d'évaporation et la transpiration des plantes. C'est un facteur essentiel au niveau du microclimat.

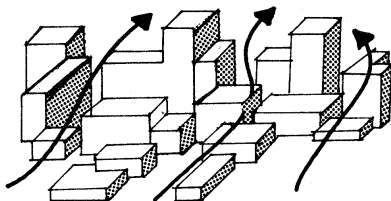
L'action de l'urbanisation sur les vents est complexe. La ville modifie la vitesse des vents et leur direction par sa rugosité, par la canalisation des vents dans les rues, mais aussi par l'influence de l'îlot de chaleur urbain qui donne naissance à des vents thermiques. Les brises thermiques, dues à la convection de l'air, apparaissent sur l'ensemble d'une ville ou d'un quartier, plus particulièrement quand les vents sont faibles. Ce phénomène s'accroît lorsque l'îlot de chaleur augmente.

Nous présentons ci-dessous les principaux mécanismes de l'écoulement de l'air autour des bâtiments en milieu urbain dense. Les mécanismes de l'écoulement de l'air autour de bâtiments isolés et de groupes de bâtiments ont été développés au point 3.1.3 de cette thèse sur les paramètres qui influencent le vent local.

L'écoulement du vent en milieu urbain est défini à partir des effets suivants :

- **l'effet de masque urbain,**
- **l'effet canyon,**
- **l'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu urbain, homogène de faible hauteur,**
- **les ensembles de bâtiments élevés.**

L'**effet de masque urbain** n'est autre qu'un effet de brise-vent à l'échelle du plan masse : les constructions par leurs actions sur le vent, peuvent se protéger mutuellement et, par là même, réduire considérablement le niveau des anomalies aérodynamiques.



Effet de masque urbain (Gandemer & Barnaud 1975).

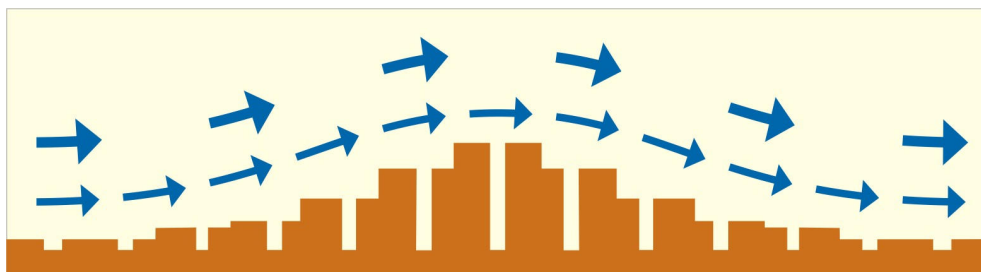
Nous pouvons toutefois énoncer globalement des conclusions pour les **ensembles construits qui sont à la fois denses et de hauteur relativement homogène et peu élevée** :

- Lorsque le vent pénètre dans ce type de plan masse et s'y enfonce, il y a une décroissance notable des niveaux moyens des survitesses et, parallèlement, une augmentation de l'intensité de turbulence. En général, les niveaux de confort requis au niveau piéton sont atteints sur l'ensemble de la zone urbaine.
- Dans ce type de plan masse, la zone de probabilité d'accidents aérodynamiques la plus forte est une bande de l'ordre de 200 mètres d'épaisseur située en périphérie de l'urbanisation ou du quartier. En bordure de ville, placer les îlots en quinconce réduit la vitesse du vent.
- A l'intérieur d'un tissu de ce type, les seuls problèmes aérodynamiques apparaissent autour des constructions dont la hauteur est au moins du double de celle de la hauteur moyenne du bâti.
- Si des espaces découverts (ou libres) avec des superficies de l'ordre de 160 000 m² (400 m x 400 m) apparaissent dans un plan masse de hauteur homogène, le vent va "retomber" dans de tels espaces et les bâtiments périphériques seront à nouveau exposés. Il faudra atteindre alors une pénétration de 200 mètres pour retrouver un effet de protection global dans le milieu construit.

Les tissus des villes anciennes, par leur densité élevée et leurs hauteurs relativement homogènes (hauteur moyenne R+4), forcent donc une grande partie du vent à les franchir par-dessus les toits. L'effet de protection dans ce type de plan masse est considérable.

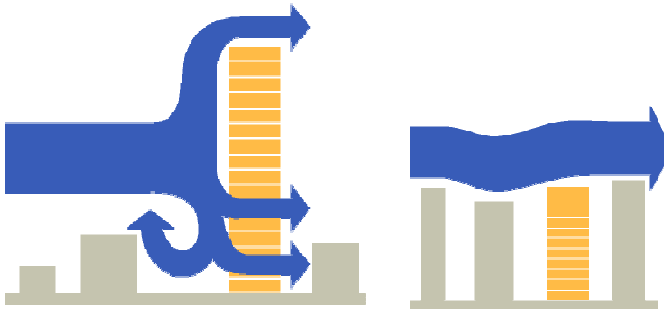
En conclusion, si seules les contingences de protection vis-à-vis du vent étaient en cause, on pourrait vivement recommander un urbanisme à hauteur homogène et de forte densité. Les espaces ouverts devraient de préférence être de taille moyenne. Les parcs ou les zones ouvertes de très grande dimension ont intérêt à être fortement plantés de manière à recréer un effet de masque dû à la végétation. Bien entendu, la disponibilité de la lumière naturelle et la ventilation nécessaire pour limiter la pollution sont également des éléments de conception à prendre en compte.

Dans les villes, le centre présente en général des hauteurs de bâtiments supérieures à celles des constructions périphériques. Pour que le vent soit dévié globalement au-dessus de la ville, les modifications de la hauteur des édifices doivent évoluer progressivement.



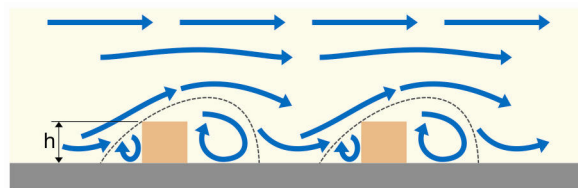
Evolution des hauteurs progressive.

Les changements de hauteur abrupts créent toujours des problèmes au niveau piéton. Ainsi, des zones de transition doivent être créées pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.

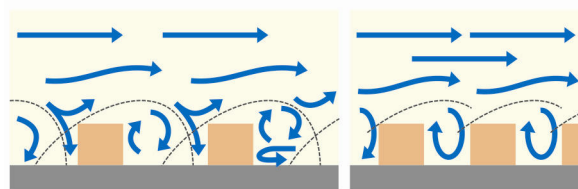


Lorsque les bâtiments sont construits en mitoyens, ils forment des rues qui créent un effet de masque supplémentaire: l'**effet canyon**. Pour que cet effet existe, il faut toutefois que la distance entre les deux côtés de la rue ne soit pas trop élevée.

Quand le vent est plus ou moins perpendiculaire au grand axe des rues (disons à 30° près dans chaque sens), trois types de régimes sont observés en fonction des bâtiments (L/H) et de la rue (H/W). Lorsque les bâtiments sont très distants ($H/W < 0.3$), ils n'interagissent pas au niveau de l'écoulement de l'air : on parle de « flux isolé » (isolated roughness flow). L'air extérieur pénètre donc largement dans l'espace qui est bien ventilé. Lorsque cet espace diminue ($0.3 < H/W < 1$), le flux se modifie et forme un « effet d'interférence » (wake interference flow). Ce flux se caractérise par des mouvements secondaires dans l'espace de la rue, là où l'effet de sillage de la face sous le vent est renforcé par l'effet de rabattement de la face au vent du bâtiment suivant. L'air extérieur pénètre moins dans le canyon que dans le cas précédent. Lorsque W diminue encore ($H/W > 1$), une circulation faible mais stable s'établit dans le canyon ; on parle d'« effet de séparation » (skimming flow). L'air extérieur entre faiblement dans le canyon et l'air intérieur crée une boucle de recirculation. L'entrée d'air neuf et la circulation de l'air intérieur sont d'autant plus réduites que le rapport H/W sera élevé. (Oke 1988)



Flux isolé

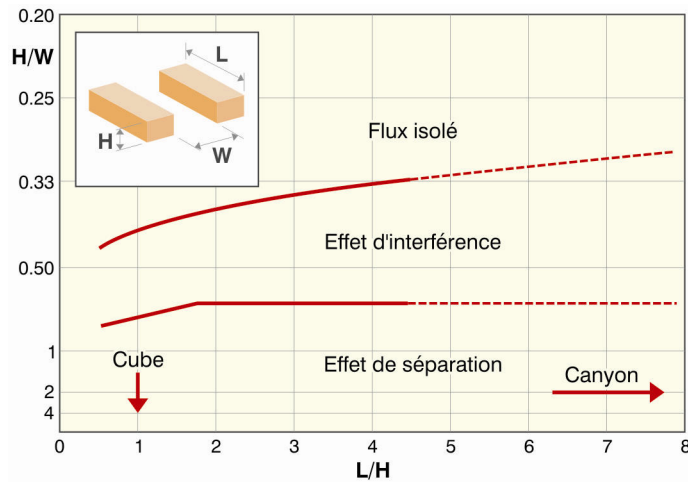


Effet d'interférence

Effet de séparation

(Oke 1988)

Oke a défini les limites qui déterminent les transitions entre ces trois régimes d'écoulement, en fonction de la géométrie de la rue (Oke 1988). Le schéma ci-dessous permet d'évaluer quel type d'effet est présent en fonction de la morphologie urbaine.

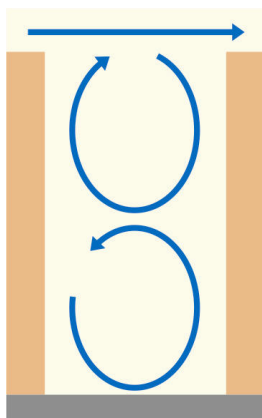


(Oke 1988).

En général, la longueur des rues (L) est assez large. Le passage entre le flux de type isolé et le régime basé sur des interférences entre bâtiments correspond donc à une rue d'une largeur égale à environ 3 hauteurs de bâtiments ($H/W=1/3$ ou $W/H=3$). Le passage entre le régime d'interférences entre bâtiments et le flux qui passe au-dessus de tout l'espace public est situé à une limite qui correspond environ à une rue dont la largeur est égale à 1.5 hauteurs de bâtiments ($H/W= 2/3$ ou $W/H=1.5$). Dans le cas de l' « effet de séparation », le flux d'air dans la rue peut être interprété comme un flux secondaire créé par le flux au-dessus des toits. Lorsque la vitesse du vent au-dessus des toits n'est pas suffisante, le couplage entre le flux du dessus et du dessous est perdu.

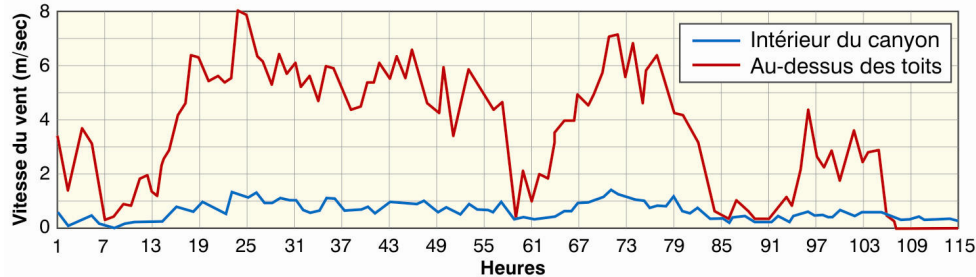
De Pauw, Shieh, Nakamura, Oke, Mc Cormick, Yamartino et Wiegand qui ont tous travaillé avec un rapport H/W entre 1 et 1.5, obtiennent des valeurs proches de **2m/s** comme limite de la vitesse du vent au-dessus des toits pour créer une circulation qui en dépende. Dans ce cas, le mouvement d'air créé au niveau du sol est dans le sens inverse du sens du vent au-dessus des toits. Pour des vitesses de vent inférieures, les effets thermiques et mécaniques deviennent prépondérants. (Santamouris & al. 2001)

Dans les canyons profonds (par exemple $H/W=2.5$), des tests en tunnel à vent ont montré que deux circulations apparaissent sur la hauteur du canyon. Cependant, les vitesses à l'intérieur du canyon deviennent alors très faibles. Dans ce genre de cas, trois phénomènes peuvent interagir : la circulation secondaire liée au flux en toiture, le gradient de température sur la hauteur important dans une rue très étroite et les effets de bords pour des rues relativement courtes ($L < 20H$).



(Santamouris & al. 2001)

Des expériences réalisées sur 10 canyons profonds pendant l'été 1997 à Athènes montrent que la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur des canyons dépasse rarement 1m/s, quelque soit la vitesse du vent au-dessus des toits. La figure ci-dessous montre un exemple de la variation de l'air à l'intérieur du canyon (ligne grise) et au-dessus des toits (ligne noire) pour un canyon de rapport H/W=1 (Santamouris & al. 2001).



(Santamouris & al. 2001).

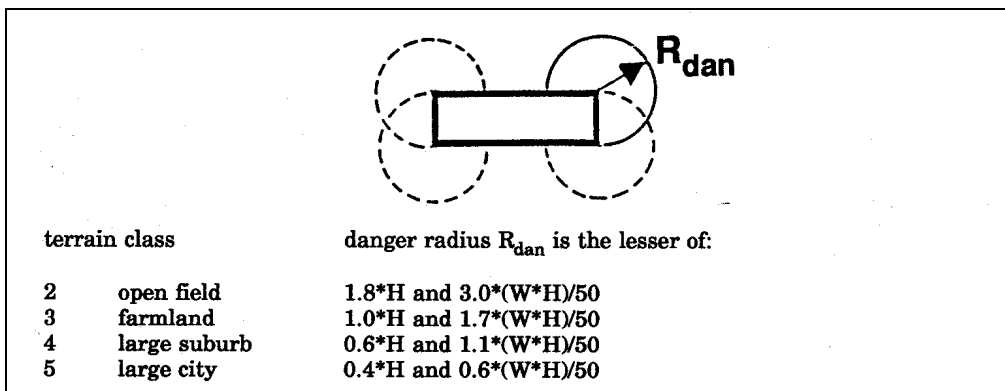
L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible, dont un exemple type est le tissu ancien de nos centres villes, perturbe de manière violente le pied immédiat de la tour sur un rayon de l'ordre du diamètre de la base. De plus, sa présence accroît nettement l'inconfort jusqu'à un rayon de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé.

Toutefois, les bâtiments de petite hauteur entourant un bâtiment élevé diminuent légèrement l'impact inconfortable du vent autour du bâtiment élevé par rapport à un bâtiment de même hauteur en site dégagé.



Effet d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible (Gandemer & Barnaud 1975).

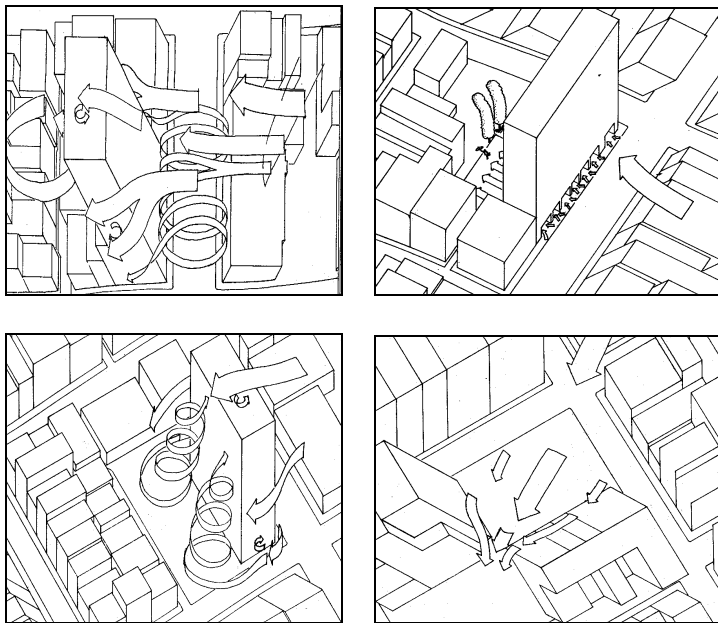
Le schéma ci-dessous permet d'évaluer le rayon critique autour des coins d'un bâtiment élevé en fonction de la densité construite. (Bottema 1993)



(Bottema 1993)

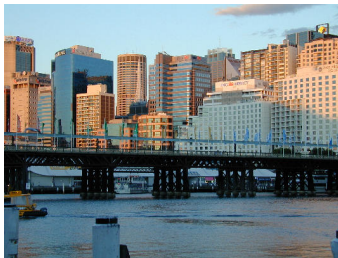
L'ensemble des effets critiques présentés pour des bâtiments isolés ou des groupes de bâtiments sont également présents lorsqu'un bâtiment de grande hauteur est implanté dans un tissu urbain homogène de faible hauteur :

- l'effet de coin,
- l'effet de sillage,
- l'effet de trou sous immeubles,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre.
- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce (dû à un effet de liaison de zones de pression différente)
- l'effet de canalisation linéaire
- l'effet pyramide



(Bosselmann & al 1988)

Dans les **ensembles de bâtiments élevés**, l'effet de masque urbain et l'effet canyon disparaissent. Les flux de vent autour de bâtiments élevés ont un haut degré de complexité. Les effets d'interaction peuvent décroître les vitesses de vent mais en général elles ont plutôt tendance à l'accroître. Les risques d'inconfort pour les piétons y sont élevés.

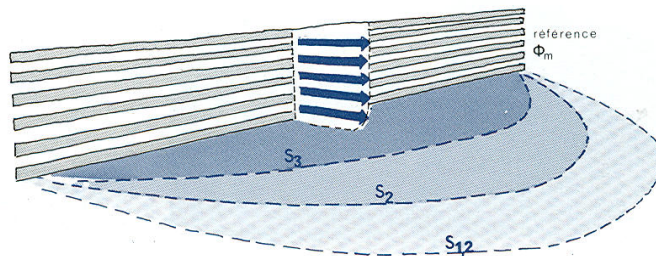


Tours à Brisbane. (Photo : K de Myttenaere).

Ce type de plan masse devrait être considéré avec une très grande prudence. Dans ce cas, nous conseillons fortement de réaliser des essais en soufflerie aérodynamique ou des simulations CFD spécifiques.

Il faut enfin souligner que la prédiction de l'effet **des brise-vents** devient assez imprécise quand on intègre ce type de structures dans des environnements où l'air est très turbulent, ce qui est le cas de nombreuses zones résidentielles et urbaines à cause de l'impact des constructions sur l'écoulement de l'air.

Le graphique ci-dessous montre les différentes zones de protection générées par la présence d'un brise-vent perméable. (Gandemer & Guyot 1981)



(Gandemer & Guyot 1981)

On constate que la protection derrière un brise-vent placé en champ de vitesse et de turbulence très hétérogène (ce qui est le cas en ville) voit son efficacité diminuer. Ainsi, le sillage immédiat S3, peut-être réduit de 70%, le sillage S2 de 55% et le sillage S1.2 de 45% par rapport aux résultats obtenus derrière le même obstacle en vent de type campagne. Or, dans cette perte d'efficacité, on ne peut expliquer qu'une perte de 20% (coefficient K) par la nature du vent devenue statistiquement du type ville (Gandemer & Guyot 1981).

En conséquence, la réduction des aires protégées derrière un brise-vent en zone urbaine est fortement marquée par l'environnement immédiat. Ainsi, on obtient de nouvelles formules de définition des zones S1.2 et S2 pour des brise-vent situés en milieu urbain :

$$S_{1.2} = 16.5 h^{0.6} L (-2.7 \Phi^2 + 2.5 \Phi + 1) K 0.55$$

$$S_2 = 1.6 h^{0.7} L^{1.3} (-7 \Phi^2 + 3.6 \Phi + 1) \cos^2(\theta) K 0.45$$

$$x_p \geq \frac{4S}{L\pi}$$

Ces expressions empiriques déterminent les zones de protection des brise-vents en milieu urbain à partir des paramètres suivants : h (la hauteur du brise-vent), L (la longueur du brise-vent), Φ (la perméabilité du brise-vent), θ (l'incidence du vent par rapport à la normale au brise-vent) et K (le facteur de site selon le tableau ci-dessous). Rappelons que la surface S1.2 est bonne pour la marche mais qu'une surface S2 est nécessaire pour le confort des zones de détente avec station immobile prolongée. (Gandemer & Guyot 1981).

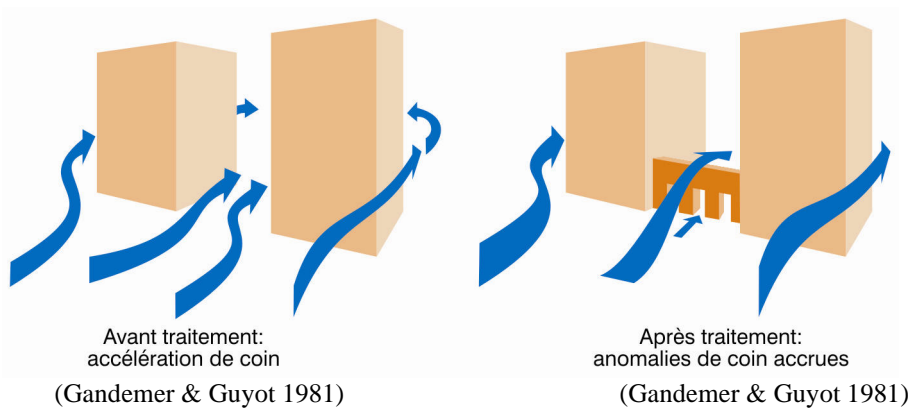
Le paramètre K prend en compte l'effet de la rugosité du terrain (et donc du profil de vent induit) et la perméabilité du brise-vent sur son effet de protection (Gandemer & Guyot 1981) :

Type de vent	Porosité moyenne de l'écran Φ	Facteur K
Vent de campagne	Toutes les porosités (entre 0 et 0.7)	1
Vent en zone urbanisée	0.2	0.8
	0.5	0.7

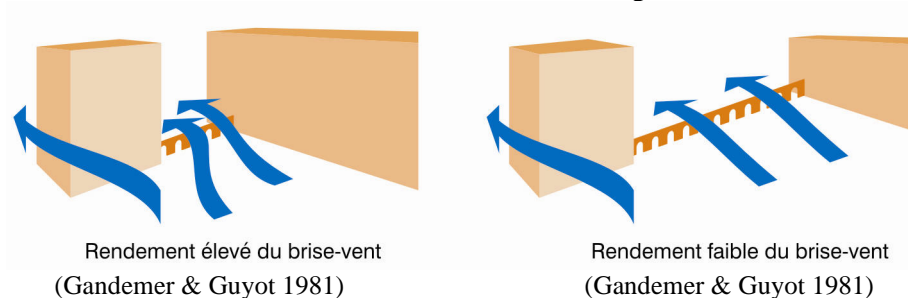
Ceci reste toutefois une approximation très grossière car la perte d'efficacité de l'écran brise-vent en milieu urbain n'est pas uniforme. Ainsi, vu les difficultés d'évaluation de l'efficacité du brise-vent en milieu urbain, si une optimisation poussée d'une situation urbaine est envisagée ou si une forte protection est recherchée ou encore si la résolution efficace d'un accident aérodynamique est demandée, il est indispensable de travailler sur un prototype en vraie grandeur dans le milieu urbain en question ou bien d'avoir recours à une étude spécifique en soufflerie aérodynamique ou encore de réaliser une modélisation CFD très précise (Gandemer & Guyot 1981).

Gardons toutefois en mémoire deux conseils généraux par rapport à l'application des brise-vent en milieu bâti (Gandemer & Guyot 1981):

- privilégier la protection d'un secteur conduit généralement à la détérioration d'un autre. Il est donc important de choisir les zones où le confort au vent est le plus indispensable et reporter le vent vers les zones où les critères de confort ne sont pas aussi importants.



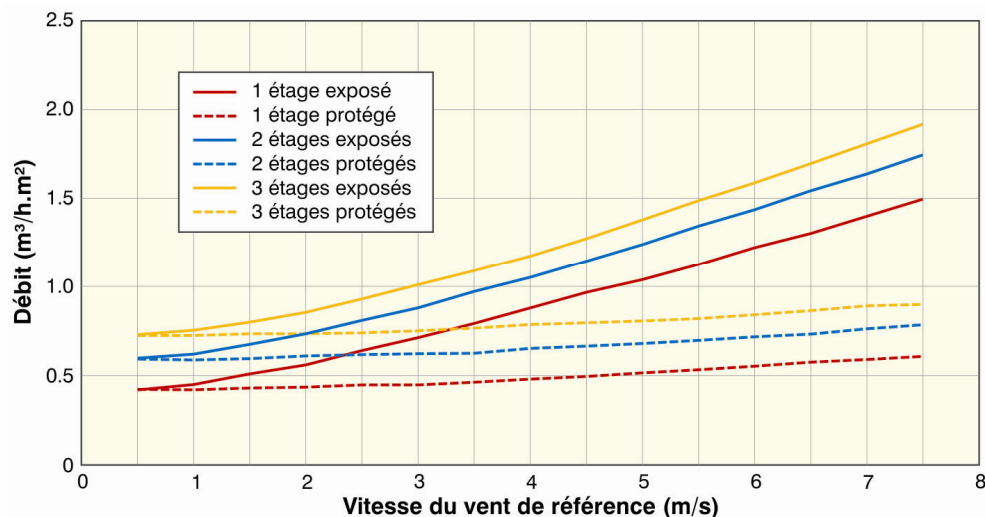
- Plus la zone est exposée ou l'anomalie aérodynamique est élevée, plus l'efficacité relative de l'action du brise-vent sera grande.



En milieu urbain, on peut répertorier trois types de zones microclimatiques du point de vue de la combinaison entre le confort respiratoire et le confort au vent :

- les zones pour lesquelles les vitesses de vent sont entre 0 et 0.4 m/s. Ces zones est considérées comme très négatives pour la qualité de l'air.
- les zones pour lesquelles le vent varie entre 0.4 et 4m/s au niveau du sol qui permettent une certaine ventilation et offrent un confort optimal. Ces zones sont à privilégier pour les espaces publics de détente.
- les zones avec un vent dont la vitesse effective vaut 3 à 6m/s qui assurent une ventilation optimale et sont donc à favoriser pour les zones à risque de pollution, comme par exemple les artères à fort trafic automobile, mais qui sont moins agréable pour un long séjour immobile.

La densité construite, en modifiant sensiblement les valeurs moyennes de pression sur les façades, influence fortement les consommations d'énergie des bâtiments et en particulier ses pertes par infiltration. Le graphe ci-dessous donne le débit d'air entrant dans des locaux par infiltration en fonction de la vitesse du vent, suivant la méthode ASHRAE et de l'exposition des façades, pour une différence de température intérieur-extérieur de 10°C (van Moeseke 2004).



Débits d'infiltration selon la méthode ASHRAE pour différentes vitesses de vent et différentes expositions (van Moeseke 2004).

Nous voyons une influence du nombre d'étages (augmentation de l'effet cheminée), mais surtout le rôle prépondérant du contexte construit autour du bâtiment. Si nous considérons un taux d'infiltration de 0.7 m³/hm² pour un bâtiment de deux étages abrité pour un vent de 4 m/s, et que nous voyons ce taux passer à 1.1 m³/hm² si le bâtiment est exposé au vent, nous avons vite fait de conclure que la demande d'énergie liée aux pertes par infiltrations peut être augmentée de 60% ou diminuée de 40% selon le type d'environnement.

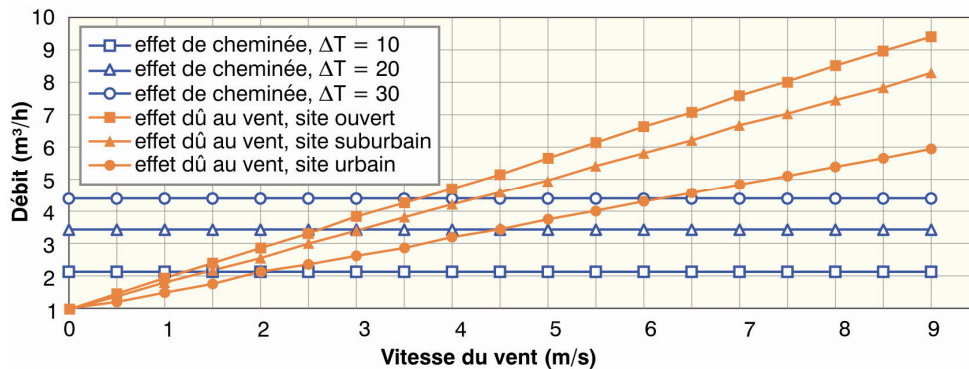
Les valeurs de consommation pour un bâtiment de bureau contemporain en site ouvert, de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux, bien isolé et présentant une bonne étanchéité sont typiquement de l'ordre de 10 000 kWh. En supposant que ce bâtiment se trouve en fait en site urbain, le besoin d'énergie ne serait plus que de 6 000 kWh. La différence n'est pas négligeable, vu que les autres besoins de ce bâtiment type seraient de 128 000 kWh pour les pertes par transmission et 56 000 kWh pour la ventilation naturelle. Ainsi, le fait de placer ce bâtiment de bureau type dans un environnement urbain permet de gagner 4000 kWh sur les infiltrations, ce qui correspond à 2 % du besoin global d'énergie de chauffage de ce bâtiment. Pour un bâtiment peu étanche à l'air, ce calcul montre que le contexte urbain permet de gagner 120 000 kWh, ce qui est évidemment énorme et représente dans ce cas 25% du besoin global d'énergie de chauffage de cet immeuble peut étanche à l'air.

La ventilation naturelle des bâtiments dépend à la fois de la vitesse du vent et de la différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur. Concevoir des bâtiments ventilés naturellement en ville nécessite donc de prendre en compte précisément les vitesses de vent dans les canyons urbains (et pas les valeurs météorologiques habituelles collectées en espace ouvert) ainsi que les différences de température réelle de l'air à l'extérieur entre le jour et la nuit, également moins favorables en ville qu'à la campagne.

Le graphe suivant permet de comparer les débits de ventilation naturelle induits par l'effet de cheminée et par le vent pour différentes vitesses de vent et pour trois types d'environnements bâtis : un site ouvert, un site suburbain et un site urbain. En utilisant différentes valeurs de différences de pressions (1, 0.75, 0.35 pour les environnements ouvert, suburbain et urbain), nous pouvons dessiner le graphe ci-dessous, pour une ouverture de fenêtre de 2m, en supposant que le débit à travers l'ouverture est donné par la relation empirique simple :

$$q = 0.6A\Delta p^{0.5}$$

Les hypothèses de calcul sont la présence d'ouvertures sur des façades opposées, ces façades ouvrantes sont perpendiculaire à l'orientation du vent et aucune perte de charges ne se produit à l'intérieur du bâtiment.



Comparaison des débits intérieurs induits par l'effet cheminée et l'effet du vent pour différentes vitesses de vent extérieur (Gratia & De Herde 2006)

Pour des vitesses de vent faible, la différence de température est le moteur principal de la ventilation naturelle. Par contre, lorsque la vitesse du vent augmente, celle-ci devient très rapidement prioritaire. Nous observons que l'effet du vent sera supérieur à celui de l'effet de cheminée au-delà d'une vitesse dépendant de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et de l'environnement construit. Cette vitesse est comprise entre 1 et 6 m/s. Les deux effets pourraient donc avoir sous le climat belge une influence du même ordre, selon les circonstances.

Notons que la moyenne annuelle de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur en Belgique est de 10K. Pour cette valeur, en milieu urbain, l'effet du vent prédomine sur l'effet de cheminée à partir d'une vitesse de vent supérieure à 2m/s, ce qui est largement en-dessous de la vitesse moyenne du vent en Belgique. Toutefois, vu les hypothèses prises et le fait que les vitesses de l'air dans les rues urbaines sont généralement inférieures à 1m/s, on peut estimer qu'il est probable que l'effet de cheminée soit prépondérant en milieu urbain.

Notons au passage que ce graphe a été élaboré pour des différences de températures et non pour des températures moyennes extérieures. Ce choix est très important parce que les villes offrent généralement un effet d'îlot de chaleur qui ne permettrait pas de représenter simultanément sur le même graphe les environnements ouverts et urbains avec une même échelle absolue de température.

E. Gratia et I. Bruyère ont analysé, à l'aide de simulations thermiques réalisées avec le logiciel TAS, les potentialités d'un refroidissement naturel efficace pour un bâtiment de bureau situé en milieu urbain, pour les conditions climatiques d'une journée chaude type en Belgique. Les résultats de cette étude sont les suivants (Gratia & al. 2004):

- pour un bâtiment abrité du vent, une ventilation unilatérale s'établit. Elle atteint le niveau recherché de 4 renouvellements d'air par heure (suffisant pour un refroidissement, sans être dérangeant pour l'occupant) avec une ouverture de la fenêtre extérieure de 60 dm² et une ouverture intérieure (porte ou fenêtre haute) vers les locaux de la façade d'en face de 132 dm².
- pour un bâtiment non abrité avec une incidence de 0°, une ventilation traversante s'établit. Avec une ouverture de la fenêtre extérieure de 3.6 dm², le taux de renouvellement d'air vaut 5 à 6 volumes/heure.
- pour un bâtiment non abrité avec une incidence du vent de 90°, une ventilation unilatérale apparaît. Une ouverture de la fenêtre supérieure de 60 dm² est nécessaire pour obtenir des taux de renouvellement allant de 3.5 volumes/heure au 5ème niveau jusqu'à 6.5 volumes / heure pour le rez-de-chaussée.

Pour éviter les influences des variations météorologiques d'un jour à l'autre, ces simulations sont basées sur une journée chaude type où la température extérieure évolue entre 11.4°C et 23.3°C, la radiation solaire globale est importante et le vent est fixé constant toute la journée à 4 m/s.

La facilité avec laquelle, en Belgique, une ventilation traversante peut s'installer même en ville a été confirmée par Geoffrey van Moeseke qui a approfondi l'étude de Gratia et Bruyère en se basant sur des répartitions de pressions plus réalistes sur les différentes façades d'un bâtiment en milieu urbain (van Moeseke & al. 2005). Il faut toutefois rappeler que les conditions de densité et de proximité telles que les conclusions de cette recherche restent applicables correspondent à des sites urbains où un rapport entre la largeur et la hauteur des rues vaut $W/H = 1.5$.

Par ailleurs, les effets de l'orientation du vent et de la densité du bâti sur la ventilation naturelle d'un bâtiment ne sont pas du même ordre. Par rapport à une situation de départ en terrain ouvert, un changement de densité va globalement réduire les débits mais ne modifiera pas les flux de manière qualitative. Inversement, un changement d'orientation du vent va avoir des effets considérables sur les mouvements de l'air, mais ne modifiera que peu les taux moyens de renouvellement de l'air. (van Moeseke & al. 2005)

Une quantification de cette réduction des débits de renouvellement de l'air en fonction du type de rugosité du terrain a été réalisée par le Florida Solar Energy Center (Chandra & al. 1983). Cette équipe de recherche propose deux facteurs de correction pour tenir compte du changement de débit en fonction de la localisation du bâtiment. Le premier facteur est le « Terrain Correction Factor (TCF) » qui prend en compte la rugosité du terrain. Le second facteur est le « Neighbourhood Correction Factor (NCF) » qui permet de tenir compte de l'influence des bâtiments voisins dans le cas d'un site suburbain ou urbain. Ce deuxième facteur est donné en fonction du rapport W/H où H est la hauteur moyenne des bâtiments situés du côté au vent du bâtiment analysé.

Dans le cas d'un site ouvert ou rural, le taux de renouvellement de l'air peut-être calculé en multipliant le débit d'air nécessaire pour un même bâtiment situé à la station météorologique par le facteur TCF, en fonction du type de ventilation choisi (nocturne ou sur 24h.). Dans le cas d'un site urbain ou suburbain, le taux de renouvellement de l'air peut être calculé en multipliant le débit d'air nécessaire pour un même bâtiment situé à la station météorologique par les facteurs TCF et NCF. Les valeurs chiffrées de ces facteurs sont donnés dans les tableaux ci-dessous (Chandra & al. 1983).

Terrain Correction Factor (TCF)		
Type de terrain	TCF pour 24h. de ventilation	TCF pour une ventilation uniquement nocturne
Mer ou grande étendue d'eau	1.3	0.98
Etendue dégagée avec peu d'obstacles, aéroports	1	0.75
Terrain rural	0.85	0.64
Terrain suburbain ou industriel	0.67	0.5
Centre d'une grande ville	0.47	0.35

Neighbourhood Correction Factor (NCF)	
Rapport W/H	NCF
1	0.41
2	0.63
3	0.77
4	0.85
5	0.93
6	1

Des expériences ont été réalisées in situ dans deux rues très étroites à Athènes pendant l'été 2002. Ces expériences montrent que malgré l'effet de canyon étroit, la ventilation naturelle des bâtiments reste un outil très utile, spécialement lorsqu'il est possible de créer une ventilation transversale. Le rapport H/W des rues étudiées est de 1.4 et 2.6. Les débits d'infiltration varient de 0.25 h⁻¹ à 0.5 h⁻¹. Une ventilation naturelle assurée par une seule fenêtre est comprise entre 1.4 h⁻¹ et 6.3 h⁻¹ pour tous les appartements avec une valeur moyenne de 3 à 4 h⁻¹. Une ventilation unilatérale mais avec deux fenêtres ouvertes du même côté donne un débit d'environ 6 h⁻¹. Dans le cas d'une ventilation naturelle traversante par deux fenêtres ou plus, le débit moyen atteint 11-12 h⁻¹, même pour des périodes où la vitesse de l'air ambiant était faible (de l'ordre de 0.5 m/s ou moins). La ventilation mécanique se situe entre 3 h⁻¹ et 9 h⁻¹ pour tous les bâtiments. (Niachou & al. 2005)

De cette étude, on peut tirer les conséquences suivantes (Niachou & al. 2005) :

- La ventilation naturelle reste un moyen de refroidissement des bâtiments très efficace malgré l'effet de canyon urbain.
- Même sous des conditions de vent très faibles (inférieures à 0.2 m/s dans le canyon), la ventilation naturelle n'est pas inexistante à cause de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.
- La ventilation naturelle est nettement plus efficace quand on peut ouvrir deux fenêtres plutôt qu'une. La ventilation traversante qui relie deux façades opposées est encore plus efficace que la ventilation transversale entre deux fenêtres situées sur la même façade.
- La ventilation hybride offre des débits plus faibles que la ventilation naturelle traversante mais supérieurs à ceux d'une ventilation naturelle par une fenêtre ou sous des conditions sans vent.

Pour améliorer la ventilation naturelle dans des centres urbains très denses, les techniques des cheminées solaires (ex : le bâtiment du BRE) et des tours de ventilation (ex : IVEG) peuvent contribuer à accroître significativement le flux d'air naturel à travers les bâtiments.



Cheminées solaire du BRE
(Photos : S. Reiter).



Tours de ventilation du bâtiment IVEG

Vu la facilité avec laquelle, en climat tempéré, une ventilation traversante peut s'installer même en ville et le rôle non négligeable du vent sur l'augmentation des déperditions par infiltration. Nous en concluons qu'il n'est pas utile sous notre climat de rechercher à tout pris les implantations les plus venteuses pour assurer une bonne ventilation naturelle des bâtiments, d'autant plus que la ventilation naturelle des bâtiments peut fonctionner même sans vent par effet thermique. Ainsi, une implantation des bâtiments en zone urbaine réduit de manière évidente les déperditions par infiltrations sans compromettre l'utilisation du refroidissement naturel.

Il existe toutefois deux bémols à l'utilisation de la ventilation naturelle des bâtiments en ville : la pollution de l'air extérieur et les niveaux de bruit importants dans les espaces publics urbains. Afin de pouvoir refroidir un bâtiment à l'aide d'une ventilation naturelle intensive, le bruit extérieur ne peut pas être gênant et la pollution extérieure doit être réduite. Lorsque les niveaux de pollution atmosphérique ou sonore sont trop importants, il s'avère généralement nécessaire de ventiler le bâtiment en utilisant un système de ventilation mécanique qui prend l'air à l'extérieur et le traite avant de l'envoyer vers les locaux et même parfois d'utiliser un système de climatisation additionnel pour refroidir les locaux. Une ventilation naturelle de nuit peut éventuellement éviter le problème de l'acoustique mais ne supprime pas la nécessité d'une qualité de l'air suffisante.

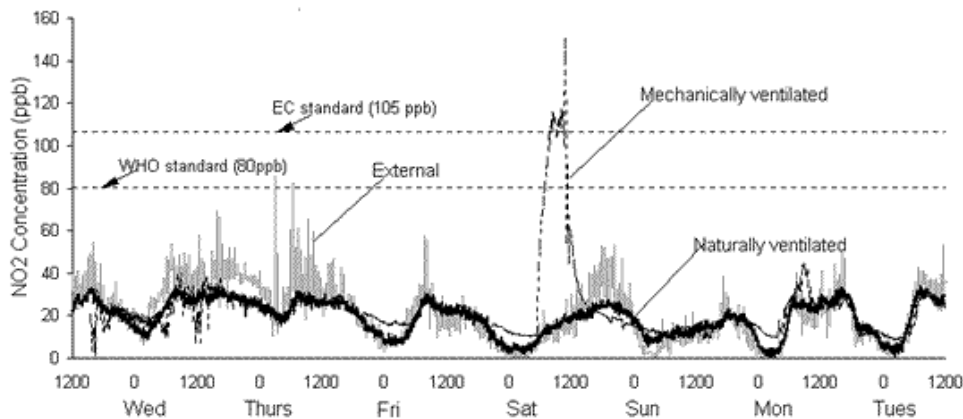
Réduire la pollution (atmosphérique et sonore) de nos urbanisations est un des éléments indispensable pour développer des systèmes de ventilation et de refroidissement naturels efficaces pour des bâtiments situés en site urbain. Toutefois, la pollution atmosphérique urbaine sert souvent, à tort, d'argument pour choisir un système HVAC plutôt qu'un refroidissement naturel des bâtiments situés en site urbain.

Le BRE a réalisé une étude pilote d'une semaine pour tester les niveaux de pollution intérieur et extérieur d'un bâtiment ventilé naturellement et d'un bâtiment ventilé mécaniquement, situés l'un près de l'autre le long d'une route à fort trafic au centre de Birmingham en Angleterre (Kukadia 1997). Les deux bâtiments étudiés sont des immeubles de bureaux présentant une occupation variable et des

activités de bureau classiques, avec une réglementation non fumeur en vigueur et aucune source interne de pollution significative.

Les observations suivantes ont été tirées de cette étude du BRE (Kukadia 1997):

- La qualité de l'air intérieur des deux bâtiments suit la tendance définie par la qualité de l'air extérieur auquel ils sont exposés. Cependant, les concentrations de polluants sont atténuées à l'intérieur des bâtiments et les pics des niveaux de concentration instationnaires mesurés à l'extérieur sont environ le double de celles mesurées à l'intérieur.
- La concentration moyenne journalière des polluants mesurée dans les deux bâtiments sur la même période d'occupation d'une semaine n'a jamais dépassé les normes établies pour la santé des occupants. Cependant, en ce qui concerne le NO₂, les valeurs guides ont été dépassées pendant le week-end pour le bâtiment ventilé mécaniquement. Cet incident illustre les dangers potentiels d'une contamination entre les prises d'air pour la ventilation d'un bâtiment et les sorties d'air vicié. Le schéma ci-dessous (Kukadia 1997) montre l'évolution des concentrations de NO₂ pendant cette semaine, à l'extérieur et à l'intérieur de chacun des deux bâtiments.



(Kukadia 1997).

Un autre type de problème est la protection par rapport à la pollution sonore. Le niveau sonore, tant au niveau des rues qu'en intérieur d'îlot, influence la possibilité de ventilation naturelle en milieu urbain. Il est donc important de placer les entrées d'air du côté le plus calme du bâtiment ou bien placer les zones les plus sensibles du point de vue sonore de ce côté.

Le niveau d'atténuation du bruit à travers une fenêtre ouverte est de 10 à 15 dB ; 3 à 5 dB supplémentaires peuvent être gagnés en utilisant des ouvertures spécialement adaptées (Nicol & Wilson 2004). Une grille de ventilation réduit généralement la performance acoustique d'un double-vitrage à celle d'un vitrage simple (Littlefair & al. 2000). En général, on considère qu'un niveau de 50dB est acceptable pour un bureau. Donc, un niveau sonore extérieur de 60-65 dB maximum devrait être favorisé afin de pouvoir assurer le confort acoustique nécessaire pour utiliser et favoriser le refroidissement naturel en ville. Notons enfin que l'atténuation du niveau sonore augmente avec la hauteur de la fenêtre par rapport au niveau de la rue mais diminue lorsque la largeur de la rue augmente (Nicol & Wilson 2004).

Évaluer les mouvements d'air en zone urbaine

Il est tout de suite évident qu'une évaluation quantitative du vent en un site est une tâche très complexe. On ne peut jamais négliger le type de contexte local. Dans certains cas, comme au pied d'un bâtiment élevé, une situation locale peut être totalement différente du macroclimat de la région.

En général, toutes les méthodes d'évaluation du vent au niveau local consistent à déterminer un rapport de recalage entre les statistiques du vent à la station météorologique la plus proche et le vent qui aura lieu en moyenne sur le site considéré. Il s'agit donc d'un facteur propre à chaque site qui dépend à la fois de la topographie locale, de la rugosité du sol, de la présence et des dimensions des obstacles (bâtiments, arbres,...) ainsi que de la hauteur d'évaluation de la vitesse du vent au niveau du site étudié. En réalité, il est souvent nécessaire d'établir différents rapports de recalage entre les données statistiques météorologiques et les caractéristiques du vent en un endroit spécifique en fonction des différents types de terrains et des obstacles qui entourent le lieu considéré. En général, on définit un certain nombre de secteurs angulaires qui présentent des caractéristiques similaires et on détermine ensuite un rapport de recalage basé sur les valeurs moyennes pour les hauteurs d'obstacles, la rugosité du terrain et sa pente sur chacun de ces secteurs d'orientation. Quand l'environnement est trop complexe, on peut choisir une division théorique en seize orientations (N, NNE, NE,...). Dans le cas d'un espace très homogène, bien entendu, ces secteurs doivent être regroupés pour le calcul. Ainsi, le cas d'un terrain bordé d'un seul bâtiment isolé peut être divisé en deux secteurs : le terrain dégagé d'un côté et le bâtiment de l'autre.

Ces méthodes sont de quatre types :

- les mesures sur site,
- les tests en tunnel à vent,
- les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics),
- Les outils simplifiés.

1/ Les mesures sur site

Les mesures sur site servent à procéder à un 'recalage' des données météorologiques d'une station par rapport aux valeurs attendues sur le site du projet. En comparant les valeurs mesurées en un moment donné à la station météorologique et les valeurs mesurées simultanément sur le site, on établit une relation entre les données météorologiques et les caractéristiques du vent sur le site en termes de vitesses et de directions du vent.

Les mesures peuvent être réalisées à l'aide d'un anémomètre à ultrasons qui donnera les valeurs de vitesse et de direction du vent dans les trois dimensions. De tels appareils sont assez simples à utiliser et connectables à un modem ou à un ordinateur à distance. On peut aussi, si le site est plus complexe, disposer plusieurs anémomètres classiques munis d'une girouette pour un faible coût.

Une étude de recalage suffisamment précise nécessite en général deux mois de mesures. Un recalage complet prendrait beaucoup plus longtemps puisqu'il faut attendre d'avoir parcouru tous les types de vents en termes d'orientation. Mais même incomplet, le recalage est d'une grande utilité, car il permet d'approcher de manière plus juste la réalité physique du site.

Les valeurs mesurées par le recalage peuvent judicieusement confirmer ou affiner les mesures théoriques du profil de vitesse ; de plus, le recalage donne aussi des informations sur les variations de direction du vent dues à l'influence de la topographie et de l'environnement du site.

Les mesures sur le site ont l'avantage que les résultats obtenus sont ceux d'une situation réelle, où l'influence de tous les immeubles et des obstacles présents sont inclus. Cette méthode d'évaluation permet d'obtenir les valeurs du vent sur un site déjà construit mais ne suffit malheureusement pas à évaluer l'impact d'un projet non encore construit ou la transformation d'une configuration existante sur les caractéristiques de vent locales ni de juger des qualités liées au vent au sein d'un projet d'espace public ou de quartier en phase de conception. Les mesures sur site sont donc peu utiles aux concepteurs de projets d'architecture et d'urbanisme et leur servent uniquement en cas d'intervention de petite dimension dans un tissu déjà construit ou bien pour faciliter la précision d'évaluation des autres méthodes décrites ci-dessous.

2/ Les tests en tunnel à vent

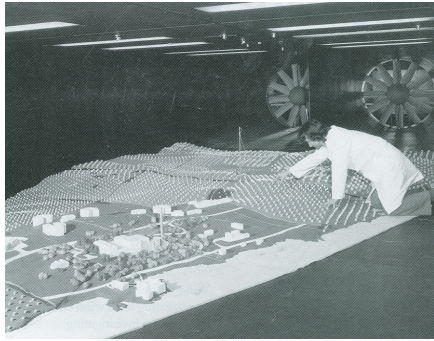
Les études en soufflerie sont les plus courantes. Les tests en soufflerie ont l'avantage que des résultats fiables peuvent être obtenus pour un grand nombre de combinaisons de vitesses et de directions du vent pour la même maquette. Il est également possible de tester en soufflerie aérodynamique le confort au vent généré dans un projet en stade de la planification. Mais les essais en soufflerie sont très onéreux et représentent donc un coût important s'il faut en réaliser plusieurs. La complexité de l'essai et le traitement des données d'un test en soufflerie nécessitent l'intervention d'un spécialiste et l'accès à une soufflerie. De plus, ils demandent un temps important. C'est pourquoi, les concepteurs de projets les utilisent généralement uniquement en dernière phase du projet dans les cas de risques importants liés au vent. Ainsi, les souffleries aérodynamiques ne servent pas en pratique d'outils d'aide à la conception pendant le processus d'élaboration du projet mais plutôt d'instrument de recherche et de méthode d'étude du vent par rapport à un projet finalisé ou une situation existante problématique.

Les photos ci-dessous montrent une soufflerie aérodynamique.

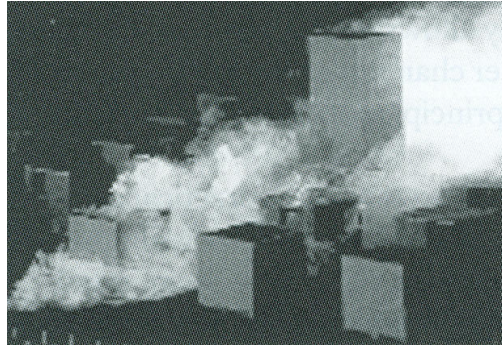


Les résultats des tests en soufflerie sont validés depuis longtemps par rapport à des cas réels et sont donc considérés comme donnant des valeurs quantitatives très représentatives des situations réelles.

Les photos ci-dessous montrent un modèle réduit placé en tunnel à vent (à gauche) et la visualisation de l'écoulement du vent dans un contexte construit à l'aide d'un test de fumée (à droite).



(Littlefair & al. 2000).



(Littlefair & al. 2000).

3/ Les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics)

Une alternative à la soufflerie est de développer un modèle numérique de l'espace et de ses environs afin d'y simuler la circulation de l'air – une sorte de soufflerie virtuelle. Les programmes pour ce type de simulations sont appelés «logiciels de simulation en dynamique des fluides» (CFD) et comportent l'avantage que n'importe laquelle des combinaisons de vitesses et de directions du vent et de configuration de l'espace et des environs peuvent être évaluées.

Cependant, les calculs impliquent des ressources informatiques importantes et il est nécessaire que l'utilisateur de ces logiciels soit expérimenté et qu'il comprenne bien cette problématique complexe de la circulation d'air. L'utilisation de logiciels de mécanique des fluides est impossible pour un architecte non initié à la mécanique des fluides et nécessite donc l'intervention de spécialistes. De plus, la validation de ces logiciels par rapport à l'étude des mouvements d'air autour des bâtiments doit encore être réalisée car il s'agit d'outils développés au départ pour l'industrie spatiale. Ainsi, la nécessaire discrétisation spatiale, l'imposition des conditions aux limites et le choix de la méthode de résolution nécessitent une étude préalable avant de se lancer dans les simulations CFD. Rappelons que ces outils informatiques de modélisation du vent sont des technologies récentes : c'est seulement depuis une décennie que les modèles informatiques permettent d'envisager des modélisations du vent autour des bâtiments par CFD.

Les éléments les plus limitatifs des simulations CFD sont les suivants :

- la précision nécessaire cause parfois problème lorsque le cas étudié est géométriquement complexe. En effet, pour pouvoir capter efficacement l'influence de certains détails architecturaux, un raffinement important du maillage est nécessaire, ce qui alourdit rapidement le calcul et le rend parfois impossible à réaliser avec nos ordinateurs actuels. Le même problème s'impose lorsqu'on désire modéliser l'ensemble d'un quartier.
- les mouvements d'air autour des bâtiments génèrent des flux d'air turbulent complexes. Il n'y a malheureusement pas pour l'instant de modèle de turbulence universellement admis qui réponde de manière optimale à toutes les conditions aérauliques présentes autour des bâtiments.
- les conditions aux limites pour l'étude du confort au vent sont généralement considérées comme stationnaires, ce qui facilite largement les simulations CFD. Malheureusement, pour l'étude de la dispersion des polluants il est idéalement nécessaire d'évaluer les concentrations moyennes et fluctuantes en fonction du temps. Les calculs CFD instationnaires sont encore très lourds à l'heure actuelle.

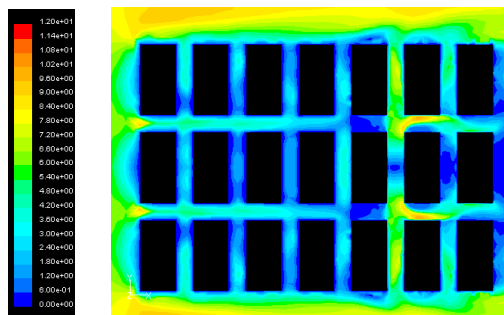
Les avantages des simulations CFD par rapport aux résultats de tests en tunnel à vent sont :

- la relative rapidité des simulations numériques par rapports à des essais en soufflerie aérodynamique,
- le traitement des résultats sur l'ensemble du domaine simulé. En effet, le modèle CFD fournit des données détaillées sur le flux de vent à chaque localisation, alors que dans des tunnels à vent, les données mesurées sont limitées en général à 20 points. De plus, un inconvénient supplémentaire des tests en tunnel à vent est qu'on doit donc déterminer au préalable quelles grandeurs doivent être mesurées à quel endroit de la maquette.
- la clarté de la visualisation des mouvements d'air qui en font un outil de compréhension et de présentation des résultats remarquable. Bien sûr, on peut aussi visualiser l'écoulement du vent par le biais d'un essai d'érosion de grain ou au moyen de fumée dans les essais en tunnel à vent. Mais les photos qui en sont tirées sont beaucoup moins précises et compréhensibles qu'une simulation CFD. En effet, les simulations CFD offrent des images complètes de tous les aspects de l'écoulement (pressions, vitesses,...) aussi bien en coupe qu'en plan et à n'importe quel endroit du champ d'écoulement.
- la CFD est un outil de pointe récent mais qui s'améliore d'année en année.
- contrairement aux tests en tunnel à vent, les simulations CFD ne nécessitent aucune réduction d'échelle, ce qui élimine donc certaines erreurs due à la réduction des géométries complexes ou aux facteurs d'échelle employés.

Selon Bottema, de nombreux tunnels à vent prédisent les vitesses de vent moyennes avec une erreur standard relative de 10 à 15%, alors que les simulations informatiques donnent une précision de 20% sur les vitesses moyennes du vent. D'autre part, il faut souligner que les simulations des vitesses de vent maximales (c'est-à-dire les plus critiques pour le confort humain) sont toujours plus proches de la réalité que celles des valeurs moyennes parce que ces zones sont moins sensibles à la complexité de l'environnement bâti.

Au vu de ces conclusions, nous avons estimé que l'outil informatique s'avère être l'instrument de recherche le plus judicieux pour développer des outils simplifiés d'aide à la conception architecturale et urbaine en rapport au vent. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser les modèles de simulation CFD pour l'étude paramétrique des mouvements d'air autour des bâtiments qui sera réalisée dans le cadre de cette thèse doctorale.

Le graphe ci-dessous montre le résultat d'une simulation réalisée à l'aide du logiciel FLUENT de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment élevé au milieu d'un tissu homogène de hauteur peu élevée. La gamme des vitesses de l'air sont présentées du bleu (vitesses très faibles) au rouge (vitesses très élevées).



4/ Les outils simplifiés

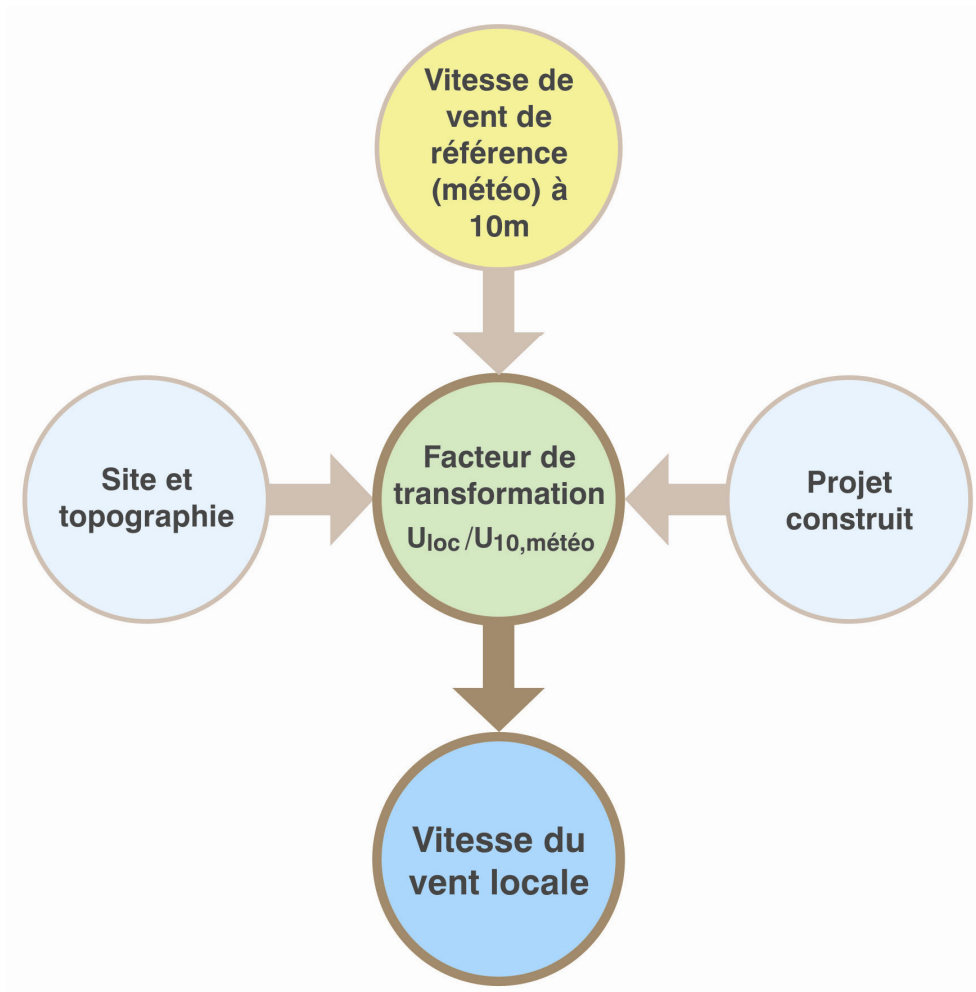
Nous constatons que la prise en compte du phénomène vent pour les projets architecturaux et urbains est possible en termes de simulations ou de tests sur modèles réduits mais que de telles études sont rarement réalisées, en raison de leur coût et du temps d'investissement qu'elles demandent. De plus, ces outils sont encore moins utilisés dans la première phase de conception, alors que les décisions prises à ce premier stade (volumes, implantation) sont de la plus haute importance pour l'influence du vent au niveau piéton. C'est donc à ce stade de conception que nous désirons proposer une nouvelle alternative.

L'architecte qui dessine son plan masse prend un grand nombre de décisions successives. Les mesures sur site, les essais en soufflerie et les simulations à l'aide de logiciels de mécanique des fluides n'apportent pas une aide applicable durant les premiers stades du projet. Les premières esquisses et les premiers volumes dessinés, les architectes ont besoin d'un outil pour évaluer les choix de base de leurs projets, afin d'aboutir à des avant-projets de haute qualité environnementale. Un outil de prédétermination du comportement du vent en site urbain est donc nécessaire dans une première phase du projet.

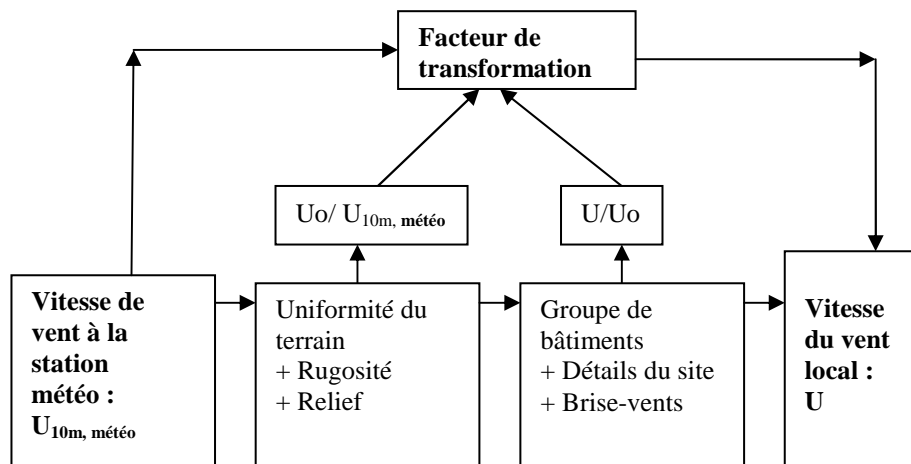
Des outils simplifiés pour évaluer rapidement les caractéristiques du vent sur un site construit à partir des statistiques météorologiques et des caractéristiques géométriques du projet sont pratiquement inexistantes. Citons toutefois des précurseurs dans ce domaine : J. Gandemer, A D. Penwarden, A. F. E. Wise qui ont posé les bases de la classification des écoulements du vent autour des bâtiments (Gandemer 1975 ; Penwarden & Wise 1975) et T. R. Oke, qui a déterminé les trois types de flux d'air rencontrés dans les milieux urbains denses pour des bâtiments de petites hauteurs relativement homogènes (Oke 1988). Ces études élaborées à partir de tests en tunnel à vent ont permis d'avoir une meilleure compréhension globale des mouvements d'air autour des bâtiments mais les valeurs quantitatives qui sont données pour évaluer les vitesses du vent sont très approximatives et ne permettent pas de réaliser un calcul des risques d'inconfort au niveau des piétons de manière suffisamment précise.

Nous avons donc décidé d'élaborer dans cette thèse doctorale des outils quantitatifs pour permettre aux concepteurs de prendre en compte les implications mutuelles des paramètres locaux du vent et des caractéristiques géométriques de leur projet architectural ou urbain, pour évaluer les conditions de confort au vent des piétons dans les espaces publics. Ces outils ont été développés à partir de simulations réalisées à l'aide du logiciel FLUENT, après avoir validé cet outil par rapport à différents tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. La validation du logiciel FLUENT ainsi que le développement de ces outils graphiques quantitatifs et leur explication sont donnés dans le chapitre suivant. Toutefois, la méthode générale d'évaluation du vent au niveau piéton est détaillée ci-dessous.

La méthode proposée pour évaluer les vitesses du vent est synthétisée dans le schéma ci-dessous. Un facteur de transformation permet d'obtenir les vitesses locales du vent à partir des vitesses de l'air à la station météorologique la plus proche. Ce facteur de transformation dépend à la fois de la rugosité du terrain et de la topographie environnante ainsi que du contexte construit



Le schéma ci-dessous explique la décomposition de ce facteur de transformation en fonction des différentes échelles.



La **méthode d'évaluation du vent au niveau piéton** nécessite d'évaluer dans un premier temps l'influence de la rugosité du terrain et de la hauteur à laquelle le vent est étudié par rapport aux données de la station météorologique la plus proche.

Chaque terrain peut être décrit par une longueur de rugosité aérodynamique Z_0 et une longueur de déplacement Z_d . Ce dernier peut être interprété comme le déplacement vertical du flux d'air dû à la présence d'obstacles et de leurs sillages. La longueur de rugosité Z_0 représente une mesure de la taille des turbulences à la surface. Les valeurs de Z_0 et Z_d ne sont pas seulement dépendantes de la hauteur des obstacles mais aussi de leur espacement. Les valeurs de Z_0 intègrent les effets des caractéristiques aérodynamiques de l'environnement du site dans un rayon de l'ordre de 3km, parfois plus. Le profil vertical de la vitesse de vent en atmosphère thermiquement neutre n'est véritablement logarithmique qu'au-dessus d'une hauteur supérieure à $20 Z_0$.

Il convient cependant d'ajouter que si les obstacles disposés sur le site sont rapprochés les uns des autres, s'ils y occupent une surface supérieure à 25% de la surface totale et s'ils ont des hauteurs du même ordre, la valeur de la longueur de rugosité n'est plus z_0 mais $z = d + z_0$ où d est une hauteur de déplacement dont la valeur vaut 0.7 à 0.8 fois la hauteur des obstacles en question (ville ou végétation dense).

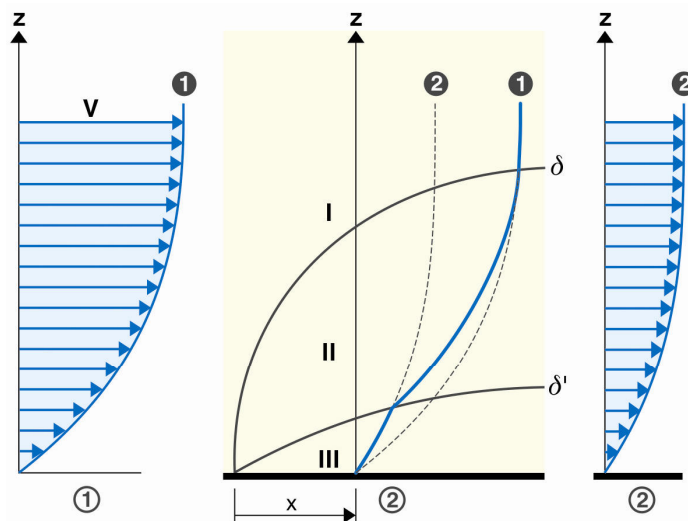
Après une analyse des valeurs de rugosité des terrains donnés dans la norme belge NBN B 03-002-1, par l'atlas européen du vent et par différentes publications scientifiques (Davenport 1960 ; Oke 1987 ; Wieringa 1992 ; Santamouris 1998), notre choix se porte sur la formule et le tableau ci-dessous afin de déterminer la vitesse du vent (U) en fonction du type de terrain (paramètres K et a) et de sa hauteur d'évaluation (Z) ainsi que de la vitesse du vent à la station météorologique la plus proche ($U_{10, \text{météo}}$). Toutes les simulations réalisées dans ce doctorat ont été effectuées avec le profil de vent urbain (bâti continu) sauf pour la validation de FLUENT où les profils utilisés dépendent des études par rapport auxquelles mes simulations sont comparées.

$$U = K z^a U_{10\text{m,météo}}$$

Terrain	K	α	Z_0	d
Mer	0.7	0.14	0.005	0
Station météo ; terrain totalement dégagé	0.68	0.17	0.03	0
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2	0.1	0.7h
Tissu suburbain	0.4	0.235	0.5	0.8h
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25	1	0.8h
Centre-ville très dense avec bâtiments très irréguliers	0.21	0.33	2.5	0.8h

La classe de rugosité à considérer est la classe la plus défavorable, correspondant au terrain le plus exposé au vent (c'est-à-dire le terrain décrit le plus haut dans le tableau ci-dessus) dans un rayon de 1 km autour de la construction, en négligeant toute zone ne couvrant pas plus de 10% du secteur angulaire (c.à.d. environ 80 000 m²). Toutefois, si dans un secteur angulaire, le bord de mer est situé à moins de 2km de la construction, on considère qu'on est dans un terrain de type « mer ». Des classes de rugosité différentes peuvent être définies pour différents secteurs angulaires si l'on désire une plus grande précision. Idéalement, la rugosité du terrain est prise en compte pour chaque secteur du site défini, ce qui modifie les valeurs de vent pour ces directions spécifiques.

S'il y a un changement de rugosité de terrain à un certain point, une nouvelle couche limite est initiée à ce point transitoire. Il y a des possibilités théoriques de traitement de ce phénomène mais qui sont très compliqués en pratique à appliquer. Les limites de rugosité sont habituellement graduelles ou intermittentes et donc difficiles à définir. Le graphe ci-dessous montre l'évolution du profil de vent qui passe d'une zone à rugosité faible vers une zone à rugosité forte.



① ② : profil vertical établi de la vitesse, avant et après le changement de rugosité

① ② : régions à faible et à forte rugosité

I, II, III : structure à trois couches de l'atmosphère après le changement de rugosité

Modification du profil de vent au passage d'une discontinuité de rugosité (Folcher 1990)

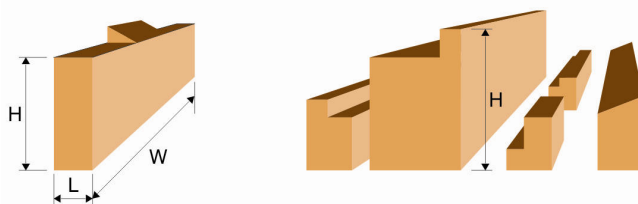
Pour simplifier cette difficulté dans nos calculs du vent, nous adoptons les trois hypothèses suivantes qui correspondent relativement bien aux modifications de profils de rugosité :

1/ A une distance inférieure ou égale à 500m par rapport à la zone de changement de rugosité, on estime que le profil de vent est identique à celui qui arrive juste avant la zone de changement.

2/ Au-delà de 500m après la modification de la rugosité de terrain, pour des bâtiments de hauteur raisonnable ($h \leq 40m$), le profil du vent correspond à la nouvelle rugosité rencontrée.

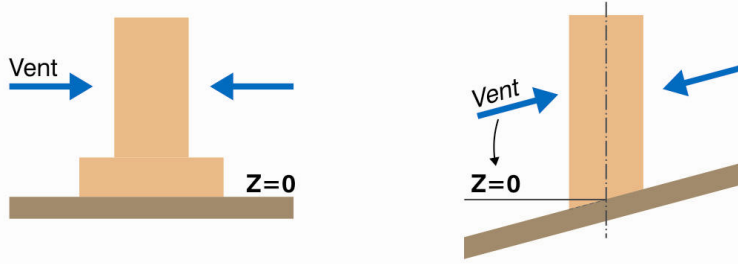
3/ Pour des bâtiments élevés : la rugosité de terrain considérée doit être celle qui se trouve à une distance égale à au moins 10 fois la hauteur de ce bâtiment dans la direction dont vient le vent.

Les bâtiments élevés sont définis par une hauteur H qui est au moins 50% supérieure à son entourage. Des détails tels que de petits penthouses ne sont pas pris en compte de la hauteur H générale.



(NBN B 03-002-1)

Le niveau de référence à considérer pour la détermination de la hauteur d'évaluation de la vitesse du vent est compté à partir du niveau moyen du sol ($z=0$) à l'emplacement de la construction (première figure ci-dessous).



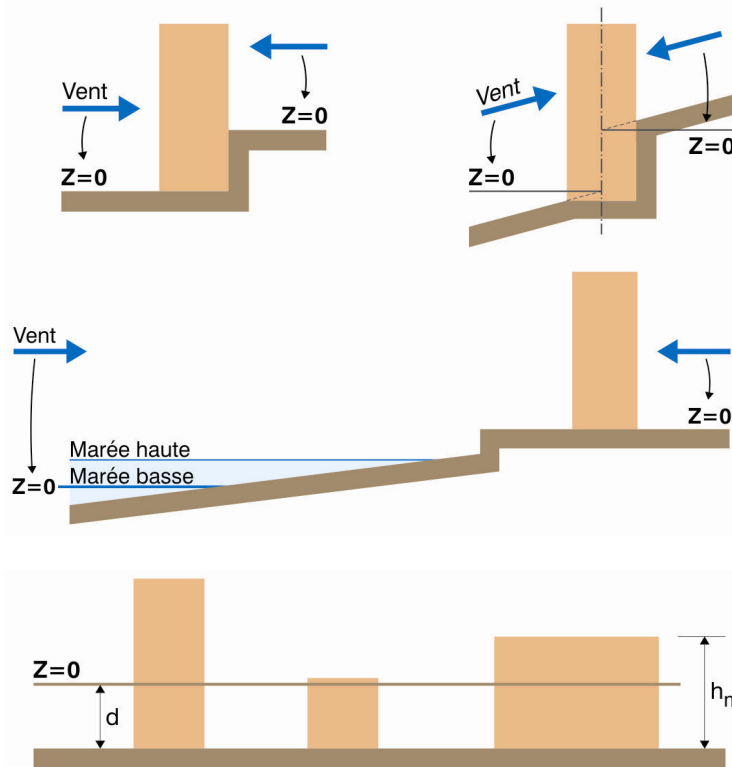
(NBN B 03-002-1)

Il y a toutefois trois exceptions à cette règle (figures suivantes) :

- une construction située au droit d'une discontinuité de la surface du terrain : pour chaque direction du vent, on détermine le niveau moyen du terrain dans le prolongement du secteur angulaire considéré.
- une construction située en bord de mer : si le niveau $z=0$ déterminé est le niveau de la mer, on considère celui de la marée basse.
- une construction située en zone de rugosité élevée (urbain): le niveau $z=0$ est situé à la hauteur d au-dessus du sol définie par la relation :

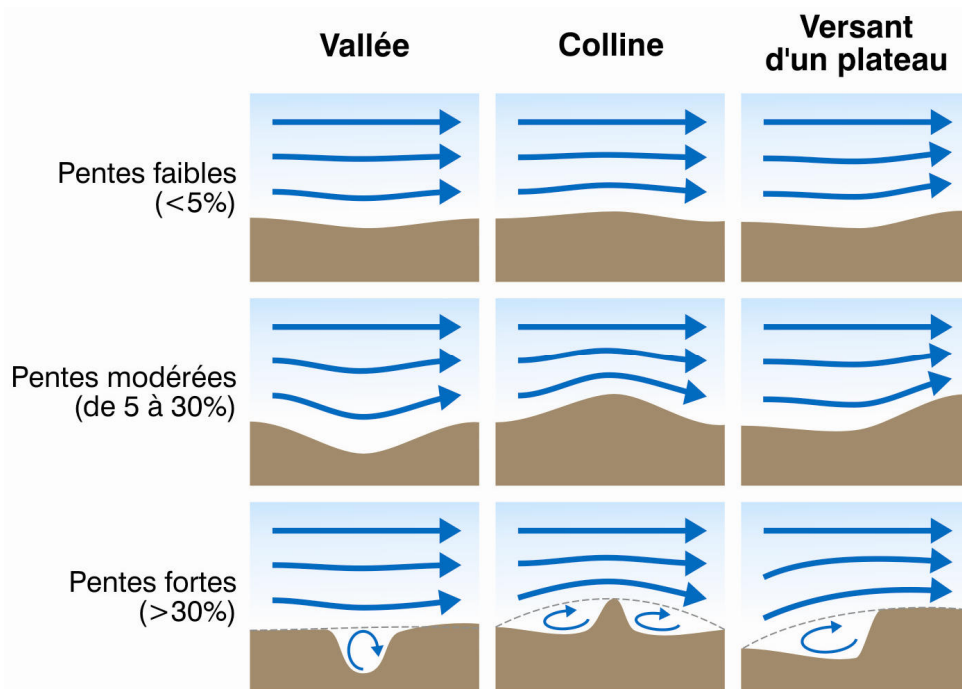
$$d = h - 4.3 Z_0 (1-a)$$

où h est la hauteur moyenne des constructions dans le secteur angulaire, Z_0 est le paramètre de rugosité du terrain et a est le rapport entre la surface construite et la surface totale du secteur angulaire. De manière simplifiée, le paramètre d est donné dans le tableau de la page précédente en fonction de la classe de rugosité du terrain.



(NBN B 03-002-1)

Pour évaluer l'influence de la **topographie** sur la vitesse du vent au niveau piéton, il faut suivre le calcul décrit ci-dessous. Si à proximité de la construction (à une distance inférieure à 500m), le terrain présente un relief accidenté (colline, versant d'un plateau, vallée), son influence doit être prise en compte par un facteur de site k_s . En effet, au voisinage de la crête d'une colline ou du versant d'un plateau, la vitesse du vent subit une accélération. Au fond d'une vallée ou au pied d'un versant escarpé, elle peut subir une décélération et, dans le cas de fortes pentes (>30%), une inversion de sens. Les graphes ci-dessous montrent le type d'écoulement du vent qui se produit lorsque le vent rencontre une colline ou une dépression du terrain.



(Hammoud 1986).

En Belgique, c'est essentiellement la présence des collines qui doit être prise en compte. La norme belge NBN B 03-002-1 donne une méthode simplifiée intéressante pour prendre en compte les effets de relief sur la vitesse du vent de manière précise. Nous décrivons ci-dessous cette méthode de calcul du facteur k_s qui détermine l'effet du relief sur la vitesse du vent.

Il y a trois cas différents à analyser différemment :

- la colline et le versant d'un plateau
- le fond d'une vallée
- les reliefs complexes

Signalons que la turbulence atmosphérique est aussi affectée par son passage au-dessus d'une colline ; mais que cet effet reste très faible et est donc généralement négligé.

1/La colline et le versant d'un plateau

Le facteur k_s se détermine en considérant la direction de la provenance du vent qui correspond à la plus grande pente (H/L) du versant au vent dans chaque secteur angulaire, H étant la hauteur de la crête par rapport au niveau bas et L la largeur du versant au vent. Lorsque le terrain en amont est accidenté, on considère que le

niveau bas est le niveau moyen du terrain sur une distance de 5km en amont de la crête de la colline en question.

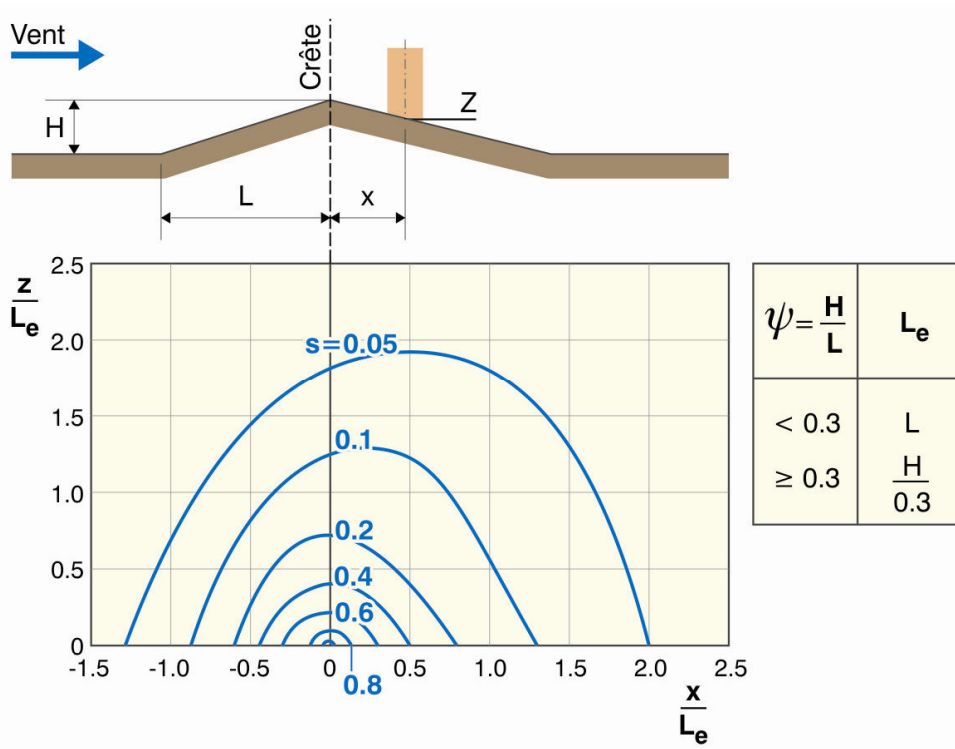
Le facteur k_s se définit alors comme suit :

- Si $H/L < 0.05$, $k_s=1$,
- Si H/L est compris entre 0.05 et 0.3, $k_s= 1+ (1.2 \times S \times H/L)$
- Si $H/L \geq 0.3$, $k_s= 1+ (0.36 \times S)$

Où S est un facteur dépendant de la localisation du point considéré en amont ou en aval de la crête. Il est donné dans les deux figures suivantes pour une colline et pour un versant de plateau respectivement. Le plateau est défini comme étant un relief dont la pente sous le vent est inférieure à 5% sur une distance supérieure à L et à $H/0.3$.

Notons que les survitesses sont plus fortes au-dessus des collines mais qu'elles se propagent sur une distance plus importante au-dessus des plateaux.

1a/ facteur k_s d'une colline

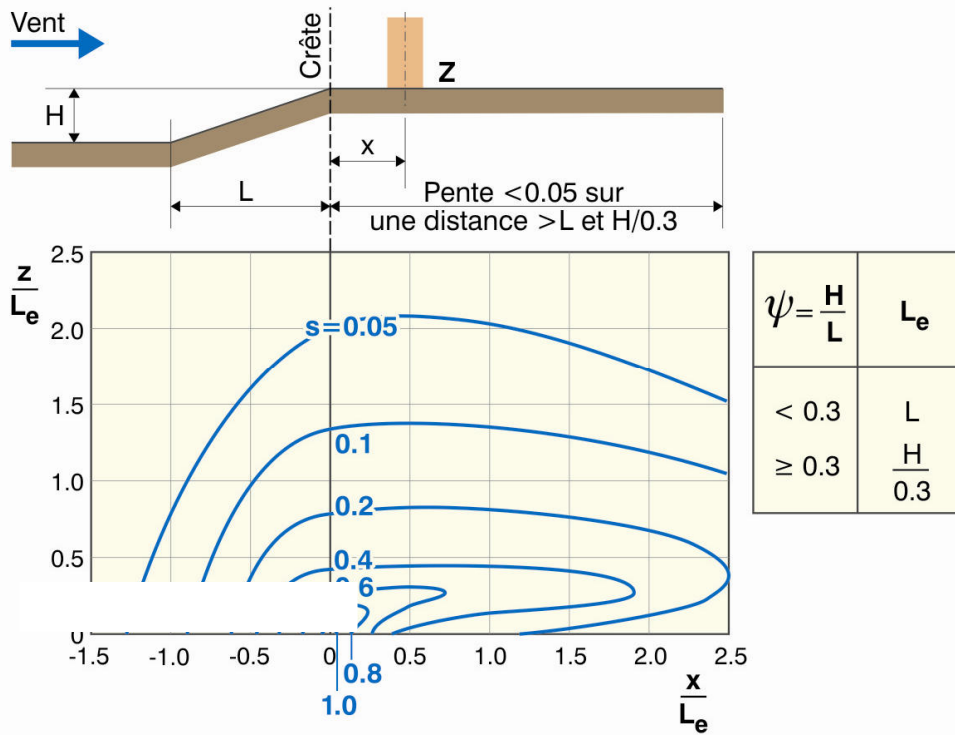


(NBN B 03-002-1)

Dans ce graphe, x et z définissent la distance horizontale et la distance verticale entre le point d'évaluation du vent et le sommet de la crête de la colline. L_e est un paramètre qui dépend du facteur H/L :

- Si $H/L < 0.3$, $L_e = L$
- Si $H/L \geq 0.3$, $L_e = H/0.3$.

1b/ facteur s d'un versant de plateau



(NBN B 03-002-1)

Dans ce graphe, x est la distance horizontale par rapport au sommet du versant du plateau et z est la distance verticale entre le point dévaluation du vent et la hauteur du sommet du versant du plateau. Le est un paramètre qui dépend du facteur H/L :

- Si $H/L < 0.3$, $L_e = L$
- Si $H/L \geq 0.3$, $L_e = H/0.3$.

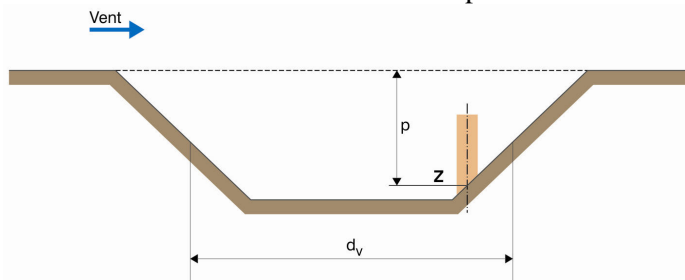
2/Le fond d'une vallée

Si la construction est située dans un **rétrécissement de vallée**, le vent soufflant dans l'axe de la vallée subit une accélération par effet Venturi et le facteur de site à considérer dans cette direction peut s'élever localement jusqu'à $k_s=1.5$ dans les cas les plus défavorables en Belgique.

Dans tous les autres cas, au fond d'une vallée, le facteur de site k_s se détermine comme suit en considérant la plus faible pente de chaque secteur angulaire :

- si $P-Z \geq 0.05 \times d_v$, $k_s=0.9$
- si $P-Z < 0.05 \times d_v$, $k_s=1$

où P est la profondeur de la vallée au point où le vent est évalué, Z est la hauteur du point considéré au-dessus du sol (à partir de la profondeur P) et d_v est la largeur de la vallée dans la direction du vent à mi-pente des versants.



(NBN B 03-002-1)

3/Les reliefs complexes

Si le relief est complexe, il convient de recourir à l'avis de spécialistes et, au besoin, à des mesures anémométriques sur le terrain.

Pour évaluer l'**influence des bâtiments** sur la vitesse du vent au niveau piéton, il est nécessaire de se référer au chapitre suivant. Nous avons élaboré des outils quantitatifs simplifiés qui donnent le rapport U/U_0 pour différents types de bâtiments.

Pour une première approximation de l'**influence de la hauteur d'évaluation sur la vitesse du vent en milieu urbain en dessous des toits**, on peut se baser sur les outils quantitatifs développés dans cette thèse pour connaître le vent au niveau piéton, puis appliquer la formule ci-dessous. Dans la couche obstruée par des bâtiments ou de la végétation dense, les variations du vent avec la hauteur sont décrites par une loi exponentielle (Santamouris & al. 2001):

$$u = U_0 e^{\frac{z}{Z_0}}$$

où U_0 est la vitesse de vent de référence au niveau piéton (1.5m de haut), Z_0 est la longueur de rugosité dans la couche d'obstacles et z est la hauteur où la vitesse de vent U est définie.

Cette loi est cependant un modèle mathématique idéalisé et qui ne peut pas donner les valeurs exactes de la vitesse en un point de la ville due à la complexité du tissu urbain. Dans une recherche ultérieure, il serait intéressant de vérifier cette formule et de la compléter pour mieux prendre en compte la complexité du vent en milieu urbain.

Pour une plus grande précision, la rugosité aérodynamique Z_0 peut être calculée par l'expression proposée par Lettau et reprise par Santamouris : $z_0 = 0.5h(A/A')$, où h est la hauteur moyenne des bâtiments, A est la surface construite verticale (en profil), A' est la surface moyenne d'un îlot (surface de la zone urbaine divisée par le nombre d'îlots).

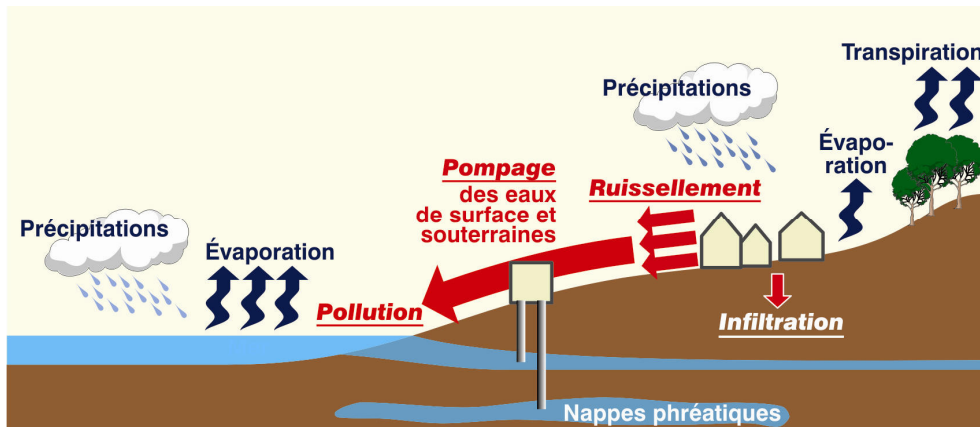
3.2.5 La modification des précipitations et de l'humidité en milieu urbain

Signalons d'abord que les surfaces imperméables réalisées par l'homme (toitures, asphalte, ...) réduisent l'infiltration des eaux de pluie dans le sol, limitent l'alimentation des nappes phréatiques et augmentent considérablement le ruissellement de surface et les risques d'inondations des surfaces situées en aval. Les agglomérations importantes qui ne tiennent pas compte du cycle de l'eau vont inévitablement subir les conséquences de leur manque de respect par rapport à la nature (inondations, crues,...).

D'autre part, la pollution de l'eau par les rejets fécaux et les rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles transforme qualitativement le cycle hydrologique. Les molécules d'eau des nuages et des pluies traversant l'atmosphère se chargent également de la pollution de l'air. L'eau qui s'infiltré dans les sols entre en contact avec la pollution du sous-sol. L'eau est donc de plus en plus polluée. Ces pollutions attaquent irrémédiablement l'écosystème et la biodiversité locale et mondiale.

L'urbanisation étalée, qui caractérise notre mode de bâtir contemporain, augmente fortement les surfaces imperméables telles que les routes, les toitures, les parkings,... Cette imperméabilisation à outrance des sols naturels réduit encore, par rapport à une ville dense, la part de l'eau qui s'infiltrate dans le sol, amoindrit encore l'alimentation des précieuses nappes phréatiques, augmente l'érosion des sols naturels, accroît la fréquence et l'amplitude des inondations ainsi que le volume d'eau douce déversé dans les mers. L'eau douce mêlée à l'eau salée diminue la concentration en sel des océans, perturbe les courants marins et participe ainsi à la modification du climat global de la planète. **Il est donc indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit.**

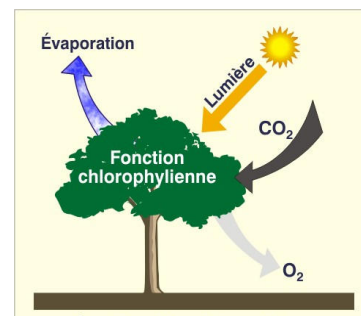
Le schéma ci-dessous donne le cycle réel de l'eau quand les hommes ont transformé et pollué l'environnement naturel.



La minéralisation des surfaces et la canalisation de l'eau souterraine ont également pour conséquence la diminution de l'humidité de l'air en ville. Ainsi, l'humidité est généralement inférieure dans les villes que dans les campagnes. L'humidité relative en milieu urbain est en moyenne de six pourcents inférieure aux données climatiques moyennes provenant des stations météorologiques (Landsberg 1981). Les plans d'eau et la végétation peuvent contribuer à accroître l'humidité localement.



Expo'92 à Séville (Littlefair & al. 2000)



On note une différence de 5% d'humidité relative entre un centre-ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variant de 50 à 100 mètres (Izard & Guyot 1979). On voit donc qu'une surface de végétation dense d'au moins 50m de large permet de compenser l'effet de l'urbanisation du point de vue de l'humidité de l'air. De nombreuses zones vertes de taille moyenne sont donc plus efficaces qu'une seule très grande surface verte pour accroître l'humidité relative de l'air en milieu urbain.

Pour compenser une forte humidité de l'air, il est par contre nécessaire de ventiler les espaces publics. Dans ce cas, la densité urbaine ne doit pas être trop forte afin de ne pas trop ralentir l'écoulement du vent.

Les agglomérations urbaines et les bâtiments élevés augmentent les précipitations parce qu'ils augmentent la rugosité de la zone en question. De plus, l'effet d'îlot de chaleur urbain accroît l'intensité des averses (Escourrou 1995). Les hauteurs de précipitations augmentent de 5 à 10% en ville par rapport à la campagne (Merlin & Choay 1996). Les protections contre les précipitations sont à prévoir en zone urbaine dans les climats pluvieux.

On peut aussi ajouter que la fréquence des brumes et brouillards augmente de 30% à 100% en périphérie de ville par rapport à la campagne (Merlin & Choay 1996). L'augmentation des jours de brouillard est due à la pollution et à la réduction de la vitesse du vent. Il s'agit donc de limiter les émissions de polluants en zone urbaine ainsi que de favoriser leur dispersion grâce à une conception urbaine qui tient compte du vent.

Evaluer l'humidité et les précipitations en zone urbaine

Les modifications de l'humidité relative ainsi que de l'intensité et la fréquence des précipitations en ville par rapport à la station météorologiques ne sont pas encore connues avec assez de précision sur un échantillon de villes suffisant pour pouvoir en tirer des règles simplifiées à adapter à tout contexte. A l'heure actuelle, il nous semble donc qu'il est préférable d'utiliser les valeurs moyennes de la station météorologique la plus proche du site.

Pour l'évaluation du confort des piétons dans les espaces publics ainsi que pour les consommations d'énergie des bâtiments, ces modifications ne devraient pas avoir un impact significatif dans le climat tempéré froid qui est le nôtre. Développer des recherches pour préciser ce point de manière détaillée ne nous semble donc pas urgent.

En revanche, des statistiques plus réalistes concernant les précipitations et l'humidité en milieu urbain deviennent de plus en plus nécessaires pour l'évaluation et la conception du milieu urbain afin de limiter les risques d'inondations. Ce point est toutefois trop spécifique pour pouvoir être davantage développé dans ce doctorat.

4. Analyse et quantification de l'influence des bâtiments sur l'écoulement du vent

« L'oeuvre de la nature est bien plus difficile à comprendre que le livre d'un poète » Léonard de Vinci.

Cette quatrième partie aborde l'étude du vent autour des bâtiments à partir de simulations numériques CFD. Après une analyse théorique des modèles de turbulence existants, une validation du logiciel FLUENT a été réalisée à partir de tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. Cette validation porte sur l'écoulement du vent dans trois types de contextes construits : un bâtiment isolé, un groupe de bâtiments et un milieu urbain dense. Cette étude nous a permis de définir des règles d'élaboration des simulations CFD. Enfin, ce chapitre présente la description d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation des vitesses du vent autour de bâtiments de formes simples. La méthodologie développée dans le chapitre de cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent, y compris au sein d'un milieu urbain dense, ou pour réaliser des études plus complexes d'un contexte particulier à l'aide de simulations CFD.

4.1 Simulations CFD

Durant la conception d'un projet architectural ou urbanistique, le concepteur a besoin d'informations significatives et utiles qui lui permettent d'ajuster ses projets, dès la première phase de conception, en fonction de leur influence sur le microclimat et en particulier sur l'écoulement du vent. C'est pourquoi nous réalisons dans ce chapitre une étude de faisabilité de la création d'un outil d'aide à l'intégration du vent dans le processus de conception des bâtiments pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics.

Le choix des simulations numériques et plus particulièrement d'un logiciel de CFD pour réaliser notre étude paramétrique du vent autour des bâtiments a déjà été expliqué au chapitre précédent, lors de la présentation des différentes méthodes d'évaluation du vent dans un contexte construit. Les paragraphes suivants se concentrent sur les paramètres des simulations CFD et l'analyse théorique des différents modèles de turbulence.

4.1.1 Les paramètres de simulation

L'écoulement du vent autour des bâtiments est un phénomène très complexe à simuler. En effet, les mouvements de fluides habituellement pris en compte en CFD impliquent souvent des objets profilés (ailes d'avions,...) ou des flux laminaires. Les mouvements d'air autour d'objets non profilés, ce qui est le cas habituel des bâtiments, dans un environnement turbulent sont nettement plus compliqués.

Le fait que la plupart du temps les bâtiments présentent des arêtes vives signifie que les écoulements d'air autour de ceux-ci présentent souvent les caractéristiques suivantes par endroits:

- stagnation de l'écoulement,
- accélération rapide,
- détachement de l'écoulement (aux angles,...),
- zones de recirculation,
- couches de cisaillement,
- rattachement de l'écoulement sur la surface.

Ces éléments sont malheureusement très difficiles à reproduire.

Nos études bibliographiques ont montré que peu d'études ont été réalisées sur les simulations numériques du vent autour de bâtiments. Les seules études courantes sont celles de l'écoulement de l'air autour d'une forme géométrique simplifiée : un cube, un cylindre, ... avec un vent perpendiculaire à cet objet. Des études commencent à apparaître sur l'étude des mouvements d'air à l'intérieur des bâtiments, ce qui est plus facile à simuler également.

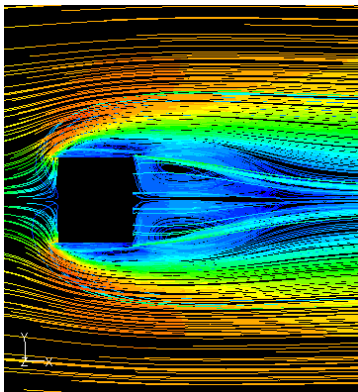
Il est donc important de prendre le temps d'analyser les différents paramètres de simulations à introduire et de choisir les modèles de calculs et les conditions aux limites les plus adaptés pour l'étude du vent autour des bâtiments.

FLUENT est un logiciel basé sur la méthode des volumes finis qui résout par itérations successives le système des équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de la continuité sur chacune des cellules d'un maillage tridimensionnel, en proposant différents modèles de turbulence.

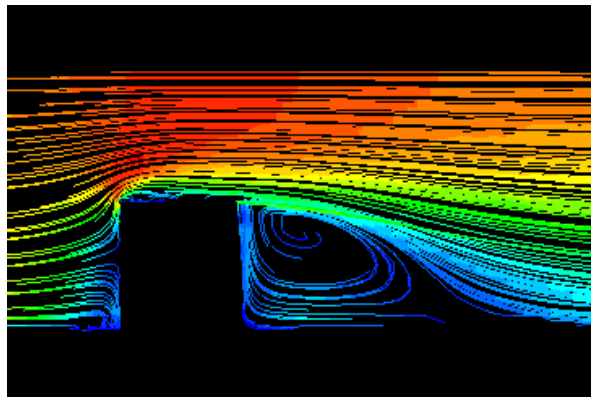
La démarche d'utilisation de FLUENT se décompose en quatre étapes :

- une description du domaine au moyen d'un maillage tridimensionnel,
- une discrétisation des équations sur chaque volume du maillage, en travaillant avec des paramètres de contrôle, en fonction d'un modèle de turbulence déterminé.
- une optimisation de la résolution avec ajustements optionnels des paramètres de contrôle ou du maillage,
- un rendu des résultats par graphiques et/ou par sorties alphanumériques.

Les deux graphes ci-dessous montrent le type de résultats graphiques produits avec FLUENT. Il s'agit de l'écoulement de l'air autour d'un cube montré en plan et en coupe.



Écoulement de l'air en plan.



Écoulement de l'air en coupe.

Différentes limites du domaine de simulations sont recommandées dans la littérature, citons les limites suivantes :

- Le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3% (Baetke et al. 1990). Le rapport de blocage est le rapport entre la surface au vent des obstacles modélisés et la surface formée par le produit de la hauteur et de la largeur du domaine simulé, qui correspond généralement au plan d'introduction de l'air dans la simulation
- Un rapport de blocage de 3% est conseillé, même pour les grands ensembles de bâtiments. La forme de la section du domaine doit de préférence suivre celle du bâtiment. (Franke & al. 2004)
- La longueur minimale du domaine est de $5 \cdot \min(L, 2H)$ en amont du bâtiment et de $8 \cdot \min(L, 2H)$ en aval de celui-ci, en prenant L égal à la longueur au vent du bâtiment et H à sa hauteur. (Blocken & al. 2003)
- La longueur minimale du domaine est de 5H en amont du bâtiment, de chaque côté du bâtiment et au-dessus de celui-ci mais de 15 H en aval du bâtiment. Pour un ensemble de bâtiments, la hauteur H doit correspondre à la hauteur Hmax du bâtiment le plus élevé. (Hall 1997)
- Une règle utilisée fréquemment pour les tests en tunnel à vent peut également servir pour définir le domaine d'une simulation CFD : le domaine doit s'étendre dans toutes les directions autour du bâtiment sur une longueur de 6 à 10H (Franke & al. 2004).

Il nous semble judicieux de choisir les valeurs les plus larges pour éviter que les frontières du domaine de simulation influencent les valeurs des vitesses du vent autour des bâtiments. Mais d'autre part, notre domaine de simulation est limité par la taille du maillage nécessaire et le temps de calcul qui en découle. Nous optons pour les limites suivantes :

- Pour le choix de la hauteur et de la largeur du domaine à simuler, le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3%.
- La forme de la section du domaine à simuler (hauteur x largeur) doit de préférence s'approcher de la coupe au vent de la configuration bâtie.
- La longueur du domaine s'étend en amont des bâtiments sur une distance de 10H et en aval sur une distance de 16H.

Généralement, dans un ensemble construit, c'est le volume des bâtiments qui détermine principalement l'écoulement du vent, surtout lorsque les bâtiments ont une forme parallélépipédique avec des coins marqués. Le niveau de détail à simuler sur les bâtiments dépend de leur distance par rapport à l'espace public pour lequel la simulation est réalisée. Le bâtiment principal ou les bâtiments qui entourent une place sont ceux qui doivent être modélisés le plus précisément : pour ces bâtiments, tout élément de plus d'1m de large devrait idéalement être représenté dans la simulation. Les bâtiments plus éloignés peuvent par contre être représentés par de simples blocs (Franke & al. 2004).

Un maillage de qualité nécessite une grande précision. Le maillage doit être fortement raffiné au niveau piéton et dans les zones où de forts gradients de vent sont prévus. Adapter le maillage est une manière efficace de reproduire les détails des flux de séparation et de rattachement sur la surface du modèle sans trop de calculs surnuméraires (Meroney & al. 1999, Kim & Boysan 1999).

Des maillages de très grande précision sont donc nécessaires, en raffinant le long des surfaces. Les maillages utilisés dans cette étude sont formés de cellules « hexahédres-wedge » dont le nombre varie entre un et deux millions.

Faire varier la vitesse du vent au niveau piéton tout en gardant le même profil de vent a peu d'influences sur la distribution de l'écoulement. Nous utiliserons donc une seule vitesse de vent au niveau piéton par type de profil de vent utilisé. Lors de la validation du logiciel FLUENT, les profils de vent utilisés dépendront des études réalisées en soufflerie aérodynamique auxquelles nos simulations seront comparées. En revanche, pour l'élaboration de nos outils quantitatifs d'évaluation du vent autour des bâtiments, les profils suivants seront utilisés :

- profil de campagne : $U = 0.52 z^{0.2} U_{10m,météo}$
- profil de vent suburbain : $U = 0.4 z^{0.235} U_{10m,météo}$
- **profil de vent urbain : $U = 0.35 z^{0.25} U_{10m,météo}$**

où U est la vitesse du vent (en m/s) à la hauteur z (en m) et $U_{10m,météo}$ vaut 12.9 m/s. La majorité de nos simulations seront basées sur le profil de vent urbain et nous indiquerons chaque fois que nous avons pris un autre profil de base.

Pour que nos résultats de simulations puissent être utilisés quelque soit la vitesse de vent moyenne à la station météorologique la plus proche, nous présenterons les résultats quantitatifs de nos simulations sous la forme du **rapport U/U_0** qui correspond au rapport entre la vitesse du vent simulée à 1.5 m de haut dans une configuration bâtie et la vitesse du vent qui serait mesurée dans un terrain totalement dégagé à cette même hauteur. Le rapport U/U_0 est donc représentatif de l'effet d'accélération ou de décélération du vent produit par le contexte construit.

Par ailleurs, lorsque nous présenterons les mouvements d'air autour des bâtiments, nous donnerons à chaque fois l'échelle des vitesses de vent considérée. En connaissant le profil de vent utilisé pour la simulation (en général un vent urbain avec $U_0=5\text{m/s}$), il est possible d'en déduire d'autres rapports U/U_0 si nécessaire.

De nombreuses sources dans la littérature recommandent les conditions aux limites suivantes pour les parois extérieures du domaine (Baetke et al. 1990 ; Hall 1997 ; Blocken & al 2003 ; Franke & al. 2004) :

- des symétries sur les bords et la surface supérieure du domaine,
- une limite « outflow » pour la surface de sortie de l'air ou parfois une condition de pression nulle pour cette surface,
- un profil de vitesse du vent variable avec la hauteur en entrée.

Le bord « outflow » impose une sortie de l'air qui correspond à un flux totalement développé ; il est donc important que la distance entre le bâtiment et la sortie soit assez importante.

Pour le traitement des zones proches des surfaces de type « mur » (sol, bâtiments,...), il existe plusieurs modèles de calcul spécifiques. Nous retiendrons :

- le modèle « wall function » pour lequel la couche visqueuse n'est pas résolue mais simulée. Le premier point de la grille doit être localisé en dehors de cette couche.
- le modèle « two-layer approach » qui calcule la couche visqueuse totalement mais nécessite un maillage très fin à la proximité des parois.

Vu la complexité de nos simulations, le choix du modèle wall function semble le plus adéquat.

Pour des études du confort au vent au niveau piéton, il est nécessaire d'utiliser des surfaces lisses (c'est-à-dire dont la hauteur de rugosité est nulle) pour les bâtiments et le sol, afin de pouvoir suffisamment densifier le maillage à proximité du sol. Franke & al. recommandent de placer au moins deux nœuds entre la limite du domaine (sol, bâtiment,...) et le point d'évaluation de la vitesse de l'air. (Franke & al. 2004)

Lorsque la vitesse du vent est faible, des effets thermiques (température de l'atmosphère, surfaces chaudes,...) peuvent influencer les mouvements d'air. Il ne sera pas tenu compte de ces effets thermiques dans la suite de notre étude pour trois raisons :

- ces effets n'influencent que les faibles mouvements d'air et ils n'ont donc pas vraiment d'impact sur le confort au vent des personnes.
- c'est une pratique habituelle pour l'ingénierie aéronautique de faire cette hypothèse.
- prendre en compte ces mouvements thermiques alourdirait fortement des simulations déjà extrêmement complexes.

Il serait toutefois intéressant de pouvoir analyser dans une recherche ultérieure certains de ces effets thermiques, tels que les brises générées par l'effet d'îlot de chaleur urbain ou les mouvements d'air qui relient les parcs urbains à leur entourage construit.

4.1.2 Les différents modèles de turbulence

Les écoulements turbulents sont caractérisés par un champ de vitesse fluctuant. En pratique, ces fluctuations peuvent être de très petite échelle et de grande fréquence et sont donc impossibles à modéliser directement avec les ordinateurs actuels. Par contre, les équations de la mécanique des fluides peuvent être moyennées ou manipulées pour retirer les fluctuations de petites échelles, en utilisant un ensemble d'équations modifiées qui peut être résolu numériquement. Ces équations modifiées présentent toutefois des variables supplémentaires qui doivent être déterminées en fonction d'un modèle de turbulence déterminé.

Signalons enfin que les simulations numériques DNS qui consistent à résoudre les équations totalement sur l'ensemble du flux ne sont possibles actuellement que pour de relativement faibles nombres de Reynolds ($Re < 10^4$). Une solution complète d'une situation variable dans le temps des équations exactes de Navier-Stokes pour les flux turbulents à grands nombres de Reynolds (comme le vent) dans des géométries compliquées ne pourront vraisemblablement pas être obtenues avant longtemps. Deux méthodes alternatives existent pour transformer les équations de Navier-Stokes de manière à ce que les fluctuations turbulentes de petite échelle ne soient pas simulées directement : la moyenne temporelle et le filtrage.

Ces deux méthodes ont donné naissance à deux groupes de modèles de turbulence :

- les méthodes RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)
- les méthodes LES (Large Eddy Simulation).

Les équations des méthodes RANS calculent les équations de transport pour les quantités moyennes de l'écoulement uniquement, pour lesquelles toutes les échelles de turbulence sont simulées. Le fait de limiter la recherche de solutions aux valeurs moyennes des variables de l'écoulement d'air réduit fortement les calculs. Lorsque l'écoulement est très stable, la solution donnée par une méthode RANS est la plus appropriée car la plus rapide. Citons les modèles k- ϵ standard et ces variantes ainsi que les méthodes RSM (Reynolds Stress Model). Jusqu'à présent, c'est essentiellement le modèle de turbulence k- ϵ standard qui est utilisé dans les simulations CFD. Malheureusement, ce modèle de turbulence semble peu approprié au calcul des mouvements d'air d'un bâtiment.

Décrivons les deux groupes de modèles de turbulence de type RANS :

- les méthodes RANS avec modèles de turbulence statistique. Il a été prouvé de nombreuses fois que le modèle k- ϵ standard donne de faibles résultats pour des flux présentant une forte anisotropie en turbulence, ce qui est notre cas. Le modèle k- ϵ standard est connu pour créer des productions peu réalistes des effets de turbulence autour des objets non profilés. Certains modèles k- ϵ améliorés ont été inventés par différents auteurs : citons celui de Kato et Launder ou le realizable k- ϵ model de Shih et al.
- les méthodes RSM (Reynolds-stress model), parfois aussi appelés DSM (Differential stress model), pour lesquels les équations de transport sont résolues pour des contraintes de Reynolds individuelles. Ces modèles donnent généralement des meilleurs résultats que les précédents pour un grand nombre de complexités de l'écoulement autour des bâtiments : zones de stagnation, gradients de pression importants, séparations du flux, zones de recirculation avec un mouvement de l'écoulement très incurvé. Mais à cause de l'équation de transport additionnelle à résoudre, ce modèle nécessite un plus long temps de calcul et un meilleur maillage pour assurer une bonne convergence du calcul.

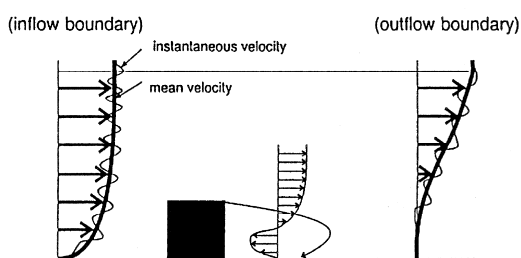
Les méthodes LES fournissent une approche alternative dans laquelle les mouvements d'air turbulents supérieurs à une maille de la simulation sont calculés par une solution variable dans le temps grâce à un ensemble d'équations qui filtrent les petites turbulences. L'avantage de cette méthode est que les mouvements essentiels du vent pour la stabilité des personnes peuvent être résolus précisément et que ce ne sont que les petites échelles de turbulence qui sont simulées. C'est donc un modèle de turbulence plus proche de la réalité.

Conceptuellement, les simulations LES (Large-eddy simulation) sont plus souhaitables que les méthodes RANS pour l'étude du vent autour des bâtiments parce qu'elles résolvent les mouvements instables de large échelle et ne simulent que les plus petites échelles de turbulence. Cependant, il faut signaler que les applications LES sont encore à leur début et que des conditions aux limites réalistes sont difficiles à établir. De plus, cette méthode nécessite de très grandes puissances de calcul et une précision de maillage spécialement importante. L'approche LES nécessite donc des calculs nettement plus lourds.

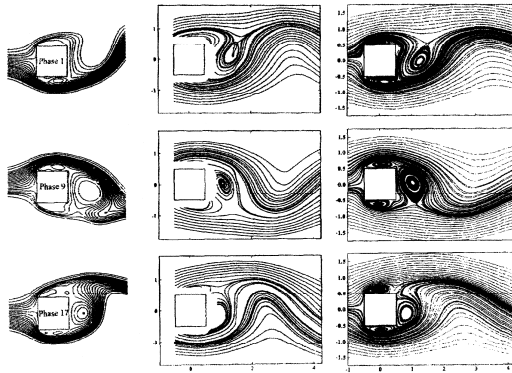
Les principales difficultés du LES sont :

- le traitement du flux turbulent à l'entrée.
- les conditions aux limites de sortie.
- l'influence du maillage sur les résultats et donc la difficulté d'utiliser des maillages graduels. Les modèles de grilles composées en LES doivent être pris avec beaucoup de précautions.
- le traitement de la zone proche des parois.
- le temps nécessaire par simulation.

Le graphe ci-dessous montre l'effet d'un obstacle sur les limites de flux de sortie, qui est une des limites actuelles des simulations LES.



Rodi a comparé les résultats d'un test en tunnel à vent, d'une simulation CFD à l'aide du modèle RMS en deux dimensions et d'une simulation CFD à l'aide d'un modèle LES en trois dimensions de l'écoulement de l'air autour d'un parallélépipède de tranche carrée. Cette étude montre que les mécanismes de base du mouvement d'air sont bien reproduits pour les trois méthodes à trois phases différentes de l'écoulement.



(Rodi 1997).

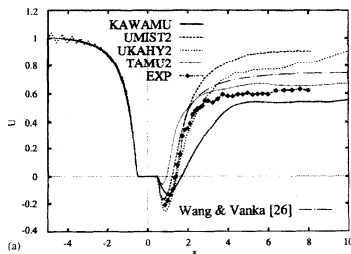
Les différentes caractéristiques suivantes de l'écoulement de l'air sont utiles pour comparer les valeurs quantitatives des méthodes de simulations: St (nombre de Strouhal : $St = fD / U_0$, dimensionless shedding frequency) , C_D le coefficient moyen de traînée et l_R la longueur de réattachement, indiquant la longueur de la région de séparation moyenne temporelle. Ces trois facteurs sont repris ici pour différentes méthodes de calcul et de maillages. (Rodi 1997)

Modèles	St	C_D	l_R	maillage
LES divers	0.09 à 0.15	2.02 à 2.58	0.94 à 1.68	125 x 78 x 20 à 192 x 160 x 48
Std k-ε WF	0.134	1.64	2.8	100 x 76
TL KL k-ε	0.143	2.0	1.25	170 x 170
RSM WF	0.136	2.15	0.98	70 x 64
RSM TL	0.159	2.43	1.0	186 x 156
Test en soufflerie	0.132	1.9 à 2.2	1.38	/

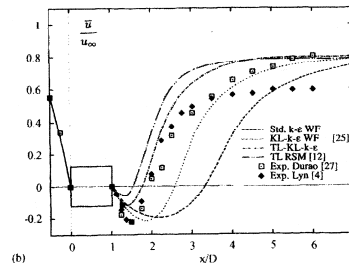
De ces résultats on peut tirer que le modèle RSM wall function donne d'excellents résultats, bien que la longueur de réattachement soit un peu trop faible, pour une représentation en deux dimensions qui comprend nettement moins de cellules (70 x 64 points) que tous les autres modèles.

Le nombre de Strouhal est prédit correctement par les modèles RANS avec wall function alors que les modèles two-layer prédisent un St trop élevé (20% trop élevé dans le cas du modèle RSM). La plupart des modèles LES prédisent bien la valeur de St . Le modèle k-ε standard prédit un C_D trop faible associé à une région de séparation trop longue. Les améliorations de Kato-Launder associées à un two-layer model permettent toutefois d'atteindre environ la bonne valeur. RSM avec wall function produit le C_D correct, alors qu'avec un two-layer model il surévalue cette valeur. La plupart des modèles LES donnent des valeurs trop élevées de C_D par rapport aux expériences ; cependant, pour les modèles LES, il n'y a pas de liaison claire entre C_D et la longueur de réattachement.

Les figures ci-dessous donnent une comparaison de différentes simulations numériques et de tests en tunnel à vent réalisés par Lyn et al ainsi que Duraio et al. Ces schémas donnent la distribution de la moyenne temporelle de la vitesse U le long de la ligne centrale des simulations. La figure de gauche présente plusieurs modèles LES alors que la figure de droite permet de comparer différentes méthodes RANS. Notons tout d'abord que dans la partie avant l'obstacle, les résultats des différentes simulations sont identiques alors que les différences se marquent dans la zone de sillage. Notons aussi que pour le RSM, contrairement au k- ϵ standard, les résultats de U donnés sont surestimés par rapport aux expériences, ce qui nous place du côté de la sécurité. Ces résultats reflètent la discussion précédente sur la longueur de rattachement. Le modèle k- ϵ standard surestime largement la zone de séparation ainsi que la zone de sillage derrière l'obstacle. Les modèles RSM sous-estiment ce sillage mais nous placent donc du côté de la sécurité. Les différents résultats LES montrent des différences surprenantes entre les différents modèles. On peut donc situer le modèle RSM comme aussi valable que de nombreuses simulations LES. D'autre part, les études réalisées pour ce carré à l'aide de modèles LES ont pris un temps 10 x supérieur à celles utilisant une méthode RANS perfectionnée, sur un même ordinateur très performant.

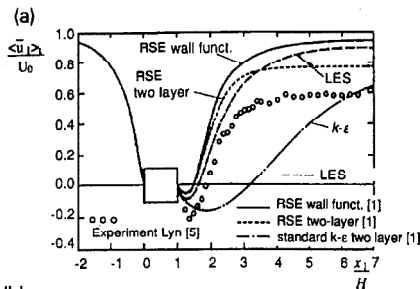


(Rodi 1997).

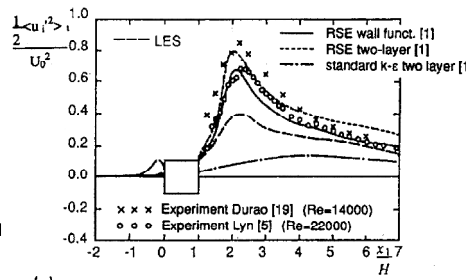


(Rodi 1997).

La même expérience (parallépipède rectangle identique) a été également réalisée par Murakami à partir de différents modèles de turbulence dont un modèle LES. Ces résultats sont présentés ci-dessous.



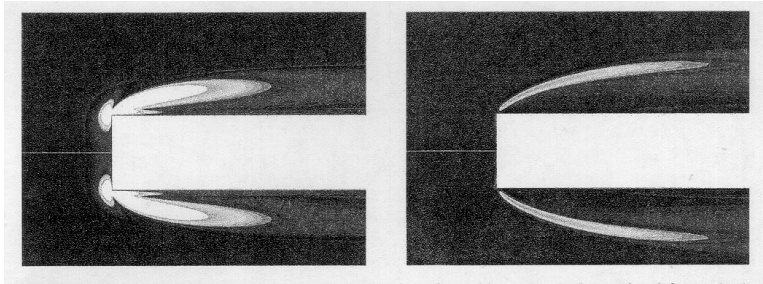
(Murakami & al. 1990).



(Murakami & al. 1990).

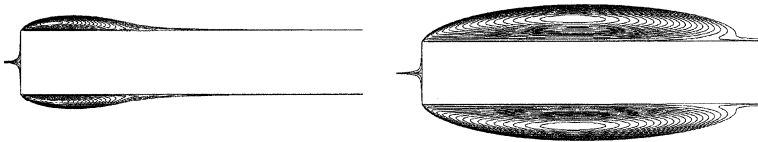
Le graphe de gauche donne la moyenne temporelle des vitesses sur la ligne centrale. Le second graphe rend compte de la moyenne temporelle de la fluctuation totale de l'énergie cinétique (k) le long de la ligne centrale. Dans ce second graphe, on voit clairement que le modèle k- ϵ surévalue largement la valeur de k avant l'obstacle et qu'il ne rend pas du tout compte de la distribution du k après l'obstacle ni de l'endroit où il est le plus important. Étonnamment, dans cet article, le modèle RSE est supérieur à la simulation LES pour l'évaluation du k . Rappelons toutefois qu'en théorie, le modèle LES devrait donner de bien meilleurs résultats. Cependant, les résultats du modèle LES varient très fort en fonction de l'utilisateur et ne devraient donc être produits que par des spécialistes confirmés en mécanique des fluides. En tout cas, le modèle RSE apparaît comme excellent pour rendre compte de la distribution du k autour d'un tel obstacle.

Les simulations ci-dessous montrent la production d'énergie turbulente cinétique k sur la face avant d'une section rectangulaire selon les modèles $k-\epsilon$ et RSM du logiciel FLUENT (Kim & Boysan 1999). Le premier surestime largement k , tandis que le second donne des valeurs correctes. En conclusion, tous les modèles qui utilisent l'eddy-viscosity-based $k-\epsilon$ surestiment la valeur de k , ce qui peut amener à la réduction ou la complète suppression de la séparation de l'écoulement.



(Kim & Boysan 1999).

Les lignes de séparation prédites par les modèles $k-\epsilon$ et RSM du logiciel FLUENT (Kim & Boysan 1999) le long d'une section rectangulaire sont données ci-dessous. Un essai en tunnel à vent de ce cas a montré que le flux se détache au coin et que le réattachement se fait sur la surface à une longueur égale à 4.7 fois la hauteur du rectangle. Le modèle $k-\epsilon$ sous-estime donc largement cette zone de recirculation et prédit le réattachement à 2 fois la hauteur du corps. Le modèle RSM donne une valeur de réattachement très proche de l'expérience : 4.3 x la hauteur de l'obstacle. Les modèles RNG $k-\epsilon$ et Realizable $k-\epsilon$ ont été testés dans cette étude mais il s'avère qu'ils n'améliorent pas les erreurs introduites par une surévaluation du k .



(Kim & Boysan 1999).

Cette analyse bibliographique a montré que la simulation numérique est un outil très intéressant et qu'il peut nous apporter beaucoup dans l'étude du vent autour des bâtiments. A la lumière de ces différentes études, il semble que les méthodes LES ne sont pas encore matures bien que prometteuses pour le futur. En effet, les résultats obtenus avec différents types de modèles LES sont parfois très variés. Toutefois, lorsque la simulation est vraiment réussie les résultats sont en général très proches de la réalité. Vu que les méthodes LES sont encore à leur enfance et que le modèle RANS $k-\epsilon$ donne des résultats trop éloignés de la réalité pour des géométries non profilées autour d'un objet isolé, le modèle de simulation le plus approprié pour notre étude semble être le modèle RSM.

Il faut aussi signaler que l'étude des mouvements d'air globaux et des vitesses moyennes de vent ne demande pas la même précision de modèle numérique que l'analyse des caractéristiques de turbulence du flux d'air. Enfin les seules simulations trouvées dans la littérature sur des cas urbains utilisent un modèle $k-\epsilon$ (standard ou realizable) et affirment que les résultats sont valables pour l'étude du confort des piétons (Gadilhe 1993, Takakura S & al. 1993, Murakami S. 1997, Blocken & al. 2004). En utilisant un modèle RSM, nous devrions déjà obtenir des résultats plus précis que ceux qui sont publiés à l'heure actuelle.

C'est donc un modèle RSM qui est choisi pour commencer notre étude des survitesses du vent autour des bâtiments. Ce choix sera toutefois vérifié par une validation du logiciel FLUENT par rapport à des essais en soufflerie aérodynamique.

4.2 Validation de FLUENT comme outil d'étude du vent autour des bâtiments

Vu que les logiciels de mécanique des fluides n'ont pas été conçus au départ pour les écoulements d'air autour des bâtiments, il est indispensable de valider le logiciel que nous allons utiliser (FLUENT) pour l'étude du vent autour des constructions.

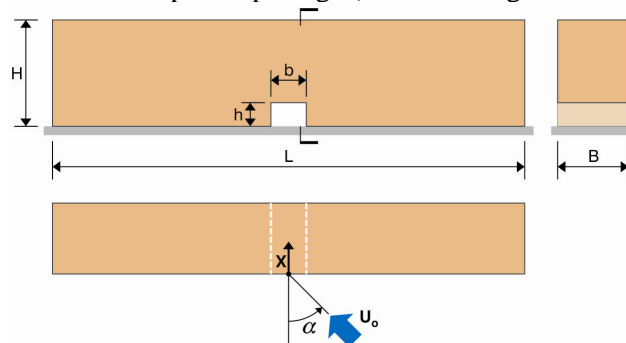
Les données fournies par des expériences sur un site réel sont peu pratiques pour servir de base à une validation car ces données sont généralement mesurées sur des moyennes de 10 minutes et qu'elles ne peuvent pas dépasser 30 minutes vu que les conditions météorologiques réelles restent rarement constantes plus de 30 minutes. Or, les simulations CFD basées sur des modèles de turbulence de type RANS donnent des moyennes de l'écoulement d'air sur des temps théoriquement infiniment longs. D'autre part, il est difficile de réaliser des mesures expérimentales sur un site avec une grande résolution spatiale vu que cela impliquerait un matériel de mesure considérable. Ainsi, les logiciels de simulations CFD doivent être validés à partir de résultats de tests en tunnel à vent, qui donnent plus de résultats pour une même configuration que les mesures sur site et partent également de l'hypothèse de conditions aux limites statiques. Enfin, rappelons que le tunnel à vent est une technologie utilisée depuis des dizaines d'années avec beaucoup de succès pour évaluer précisément les problèmes du vent autour des bâtiments.

Nous avons donc réalisé une validation de FLUENT comme outil de simulation du vent autour des bâtiments en comparant nos résultats par rapport à des tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. Cette validation s'est faite en trois étapes :

- la validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un bâtiment isolé.
- la validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un groupe de bâtiments.
- la validation de FLUENT pour l'étude du vent dans un tissu urbain dense.

4.2.1 Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un bâtiment isolé

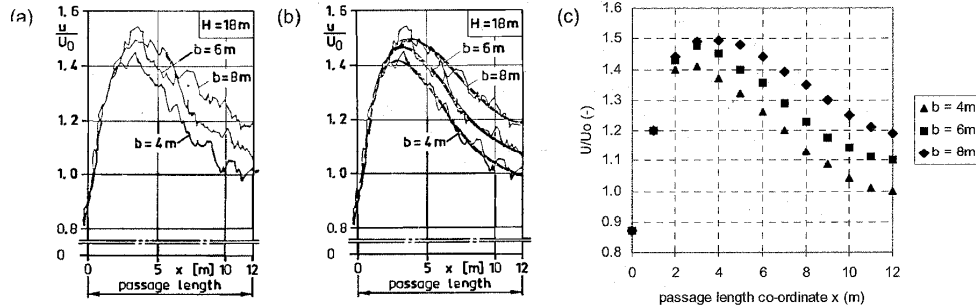
Notre choix pour la configuration de validation se porte sur le bâtiment ci-dessous : un bâtiment parallélépipédique de 80m de long, 12m de large et 18m de haut, percé en son centre par un passage (de 6m de large et 4m de haut) au niveau piéton.



(Blocken & al. 2003).

Cette configuration a été choisie car elle permet de comparer de manière précise et quantitative l'effet d'inconfort généré au niveau piéton (à 2 m de haut) à l'intérieur de ce passage sous immeuble avec des essais en tunnel à vent et des simulations à l'aide du modèle k-ε réalisable de FLUENT (Wiren 1975 ; Blocken & al. 2003).

La figure ci-dessous représente les résultats de tests en tunnel à vent donnés par Wiren et la représentation simplifiée que Blocken & al en ont tirée. Nos simulations seront comparées avec la courbe du milieu, celle qui a été établie pour une largeur du passage de six mètres (b=6m).

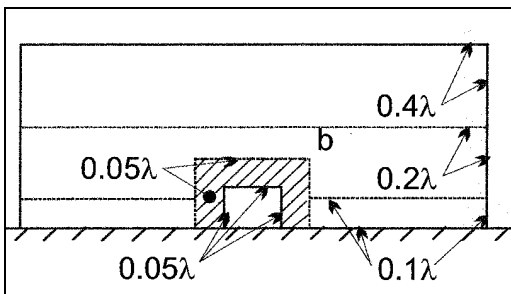


(Blocken & al. 2003).

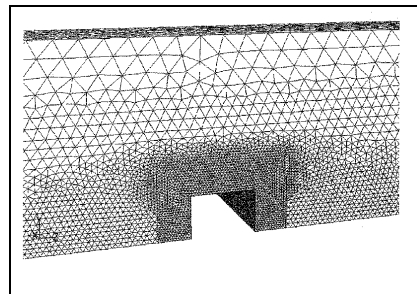
La section totale de notre simulation couvre 108m en hauteur et 480m de large, ce qui implique un rapport de blocage de 2.8%. Nous avons donc bien un domaine dont le rapport de blocage est inférieur à 3%, ce qui a été choisi comme limite au point 4.1.1. De plus, la forme de la section du domaine correspond à la forme de la façade au vent du bâtiment simulé.

La profondeur de notre domaine de simulation est fixée à 480m, dont 180m avant le bâtiment. C'est un domaine très long, qui correspond aux limites les plus strictes trouvées dans la littérature, à savoir une longueur de 10 H en amont du bâtiment et une longueur de 16 H en aval.

Les valeurs de maillage recommandées par Blocken & al. sont représentées dans le schéma ci-dessous, où le paramètre λ est égal à $(b+h)/2$, ce qui pour notre simulation signifie que $\lambda=5\text{m}$. Les simulations de Blocken & al. présentent donc des mailles dans le passage sous l'immeuble d'une dimension égale à $0.05\lambda = 0.25\text{m}$. Des mailles de même taille sont appliquées sur la façade au vent du bâtiment autour du passage parce que de forts gradients de vitesse devraient y apparaître. Blocken & al. montrent que ce raffinement du maillage dans les zones sensibles d'écoulement de l'air est extrêmement important et que les valeurs données ici semblent suffisantes pour capturer le phénomène. (Blocken & al. 2003)



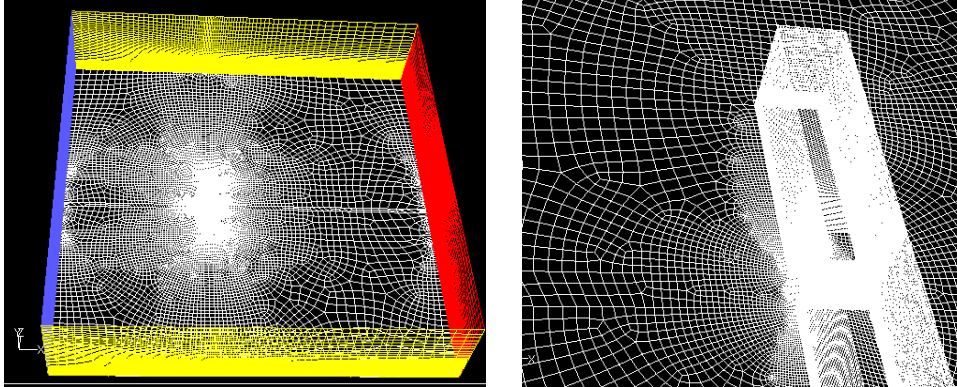
(Blocken & al. 2003).



(Blocken & al. 2003).

Dans nos simulations, la précision du maillage est poussée à 0.2m sur l'ensemble de la face au vent du bâtiment ainsi qu'à l'intérieur du passage sous immeuble.

Notre maillage compte 1 384 836 cellules de type « hexahédres-wedge » à la place du maillage tétraédrique choisi par Blocken & al. Le dessin ci-dessous à gauche montre la répartition des mailles de notre simulation le long des surfaces extérieures du domaine de simulation. Celui de droite montre un agrandissement des surfaces de notre maillage au niveau du bâtiment. On voit que ce maillage est fortement raffiné à proximité du bâtiment.

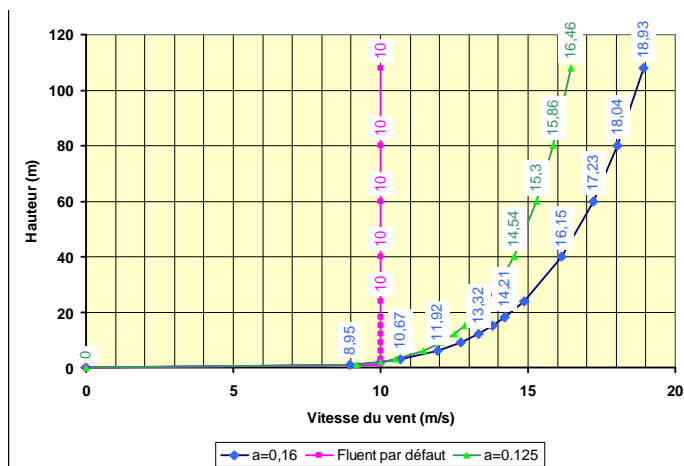


Les conditions aux limites de ma simulation sont les suivantes :

- Ciel= symétrie
- Bords= symétrie
- Sortie= outflow

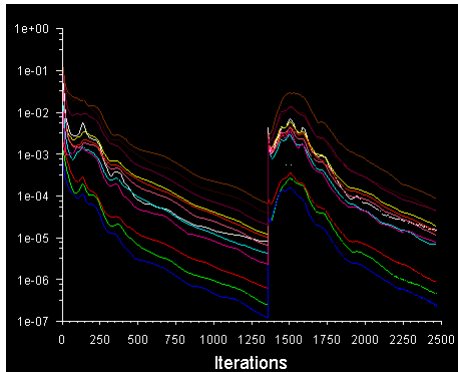
Le profil de vent utilisé est un élément majeur pour obtenir des résultats de qualité. La vitesse du vent à l'entrée du domaine doit correspondre dans ce cas au profil de vent utilisé dans les essais en tunnel à vent de Wieren pour que la comparaison soit exacte. Le profil de vent injecté est donc celui que Wieren annonce dans son article : $U = 10 (z/2)^{0.125}$ avec une intensité de turbulence de 14% au niveau piéton. Il s'agit d'un vent très fort, puisqu'il correspond à une vitesse de vent de 10m/s au niveau piéton. Le graphe ci-dessous montre trois profils de vent différents :

- en rose, le profil standard de Fluent : un vent constant sur la hauteur (sauf dans la couche limite jointive aux parois).
- en vert, le profil de vent choisi pour notre simulation car il correspond au profil des essais en tunnel de Wieren et des premières simulations de Blocken & al sur la même configuration (Wieren 1975 ; Blocken & al. 2003).
- en bleu, le profil de vent que Blocken & al utilisent pour faire coïncider leurs résultats avec ceux de Wieren et dont la justification ne me paraît pas valable.

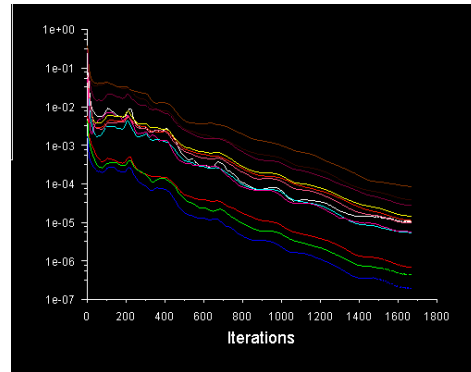


En se rappelant que le bâtiment a une hauteur de 18m, il est évident au vu de ce schéma que les résultats obtenus avec différents profils de vent donneront des niveaux différents d'inconfort au vent.

Différents essais ont été réalisés pour optimiser la rapidité de la convergence de nos simulations. Ces tests montrent par exemple qu'un même maillage converge plus rapidement s'il est lancé directement au 2d ordre que s'il est d'abord convergé au premier ordre avant d'être affiné au second ordre. La méthode en deux temps facilite pourtant la convergence d'autres types de simulations numériques, comme par exemple la convection naturelle à l'intérieur d'un local.



Convergence en 2 temps : 2500 itérations.

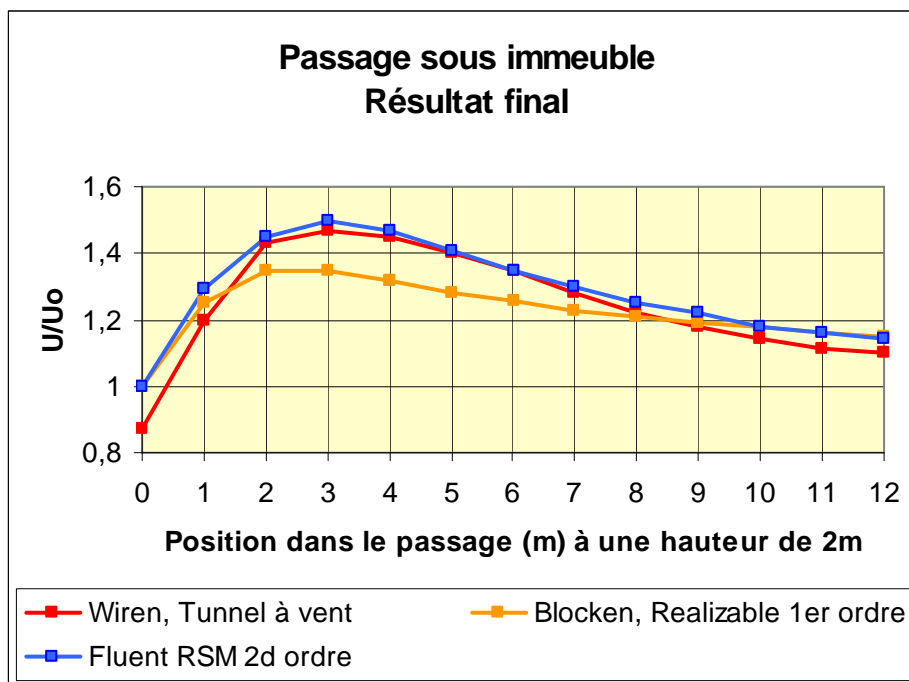


Convergence directe : 1700 itérations

Le graphe ci-dessous présente les valeurs obtenues par :

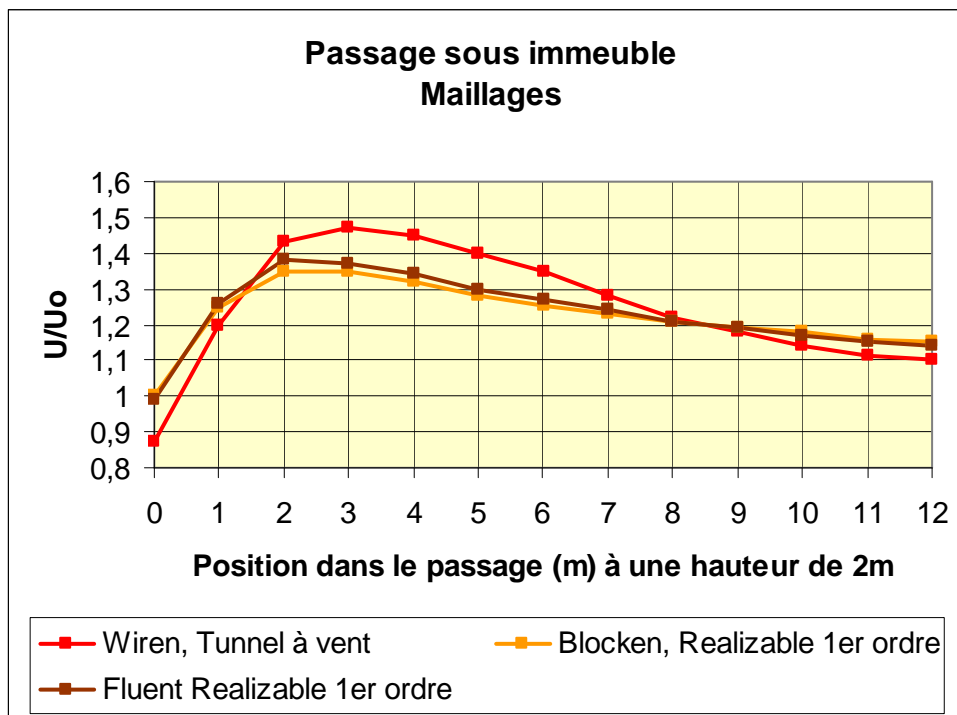
- Wiren, grâce à des essais en tunnel à vent : en rouge.
- Blocken & al, pour une simulation FLUENT réalisée avec un maillage tétraédrique, le même profil de vent que Wiren et le modèle k-ε realizable convergé au 1^{er} ordre : en orange.

Les résultats de notre simulation sont présentés en bleu. Ils ont été obtenus grâce à une simulation FLUENT réalisée avec un maillage dont les cellules sont du type « hexahédres-wedge » et le modèle Reynolds Stress (RMS) convergé au 2d ordre.



Ce graphe montre que nos résultats de simulation sont très proches de ceux obtenus par Wiren en tunnel à vent et qu'ils sont meilleurs que ceux obtenus par Blocken & al. Les paragraphes ci-dessous vont analyser quels sont les paramètres qui ont le plus influencé l'amélioration du résultat simulé.

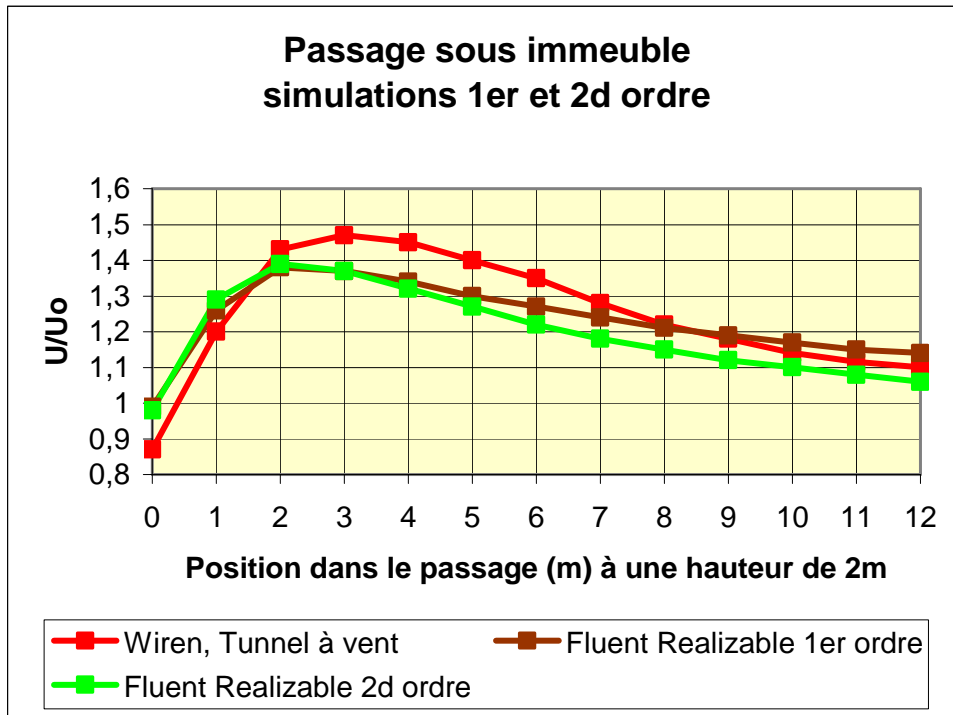
Une simulation a été réalisée pour se rapprocher au maximum des paramètres utilisés par Blocken & al afin de vérifier si les résultats obtenus sont plus ou moins reproductibles. Le graphe ci-dessous compare nos résultats et ceux de Blocken & al pour un même modèle de turbulence k-ε réalisable convergé au premier ordre et utilisant la fonction « non equilibrium wall function » au niveau des murs. Notre maillage a été basé sur le même ordre de grandeur de cellules que celui de l'étude de Blocken et al. Les deux simulations utilisent un maillage non-structuré afin de pouvoir avoir des zones très raffinées d'autres zones beaucoup moins denses. On voit que les résultats de notre simulation et de celle de Blocken & al sont quasiment identiques, ce qui permet d'assurer la reproductibilité de ces résultats.



La très faible différence de résultats entre nos deux simulations s'explique parce que Blocken a utilisé un maillage tétraédrique alors que nous utilisons un maillage hexahédrique, qui limite la diffusion des erreurs numériques. Lorsque c'est possible, il est donc préférable d'utiliser un maillage hexahédrique mais le test ci-dessus montre que la très faible différence entre les résultats quantitatifs permet de négliger l'erreur de diffusion numérique d'un maillage tétraédrique lorsque seul ce cas peut être appliqué. En effet, les maillages tétraédriques restent très utiles pour des géométries complexes où la taille du maillage devient une limitation car ils permettent une grande précision du maillage dans certaines zones avec un ensemble de cellules limité par rapport au même cas réalisé avec un maillage hexahédrique. Vu que notre travail se porte sur des géométries relativement simples pour tirer des règles de conception par rapport à la volumétrie générale du bâti, nous utiliserons des maillages hexahédriques.

Les deux graphes suivants comparent les résultats de nos simulations réalisées au premier et au second ordre avec le test en tunnel à vent de Wiren.

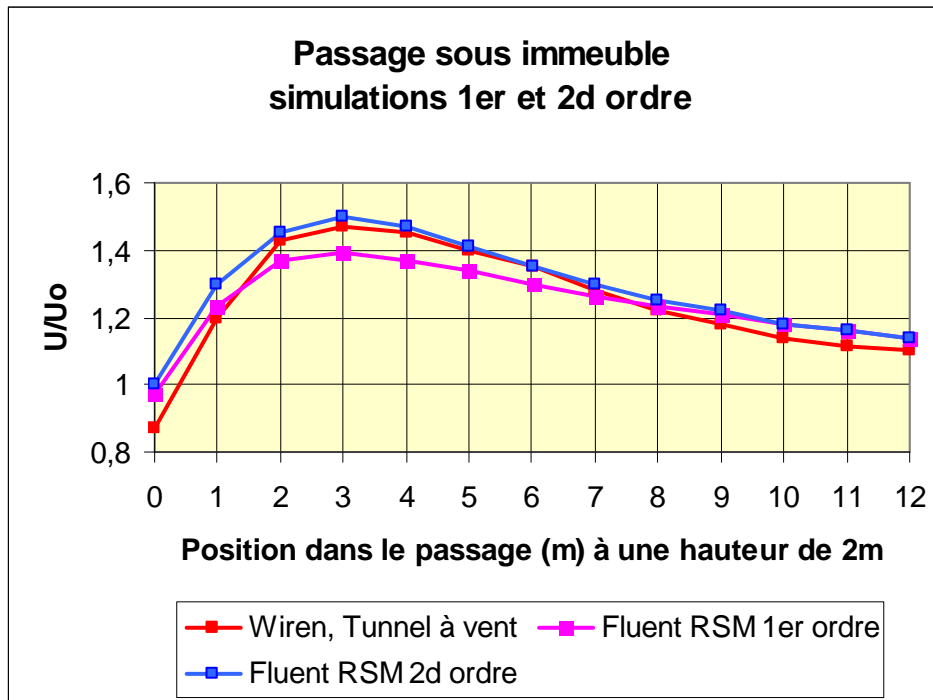
Dans le graphe ci-dessous, il s'agit d'analyser les performances d'une simulation réalisée avec le modèle de turbulence k-epsilon réalisable au 1^{er} ordre et d'une simulation k-epsilon réalisable au 2d ordre.



Les résultats de cette comparaison correspondent à ceux décrits par Blocken & al mais notre conclusion est différente. On remarque que le niveau d'inconfort maximal est situé au même endroit et présente une même valeur quelque soit l'ordre de calcul utilisé avec ce modèle de turbulence. Blocken & al se basent sur le fait que les simulations du second ordre sont plus difficiles à faire converger pour conseiller l'utilisation de simulations du premier ordre. Nous estimons que c'est un choix un peu rapide. En effet, la simulation de second ordre offre le même résultat pour la pointe d'inconfort maximal qu'un calcul au premier ordre mais elle permet d'améliorer substantiellement l'estimation du facteur d'inconfort dans la seconde moitié du passage sous l'immeuble. Ainsi, la pente descendante de cette courbe du facteur de confort dans le passage pour piétons est nettement mieux simulée par un modèle k-epsilon réalisable du second ordre que du premier.

Ajoutons toutefois que le modèle converge plus lentement au second ordre, ce qui est vraisemblablement encore plus difficile dans le cas d'un maillage tétraédrique comme celui de Blocken & al.

Ensuite, nous comparons ci-dessous les résultats de simulations réalisées à l'aide du modèle de turbulence RSM convergé respectivement au premier ordre et au second ordre. Il est intéressant de noter que le modèle RSM converge très bien pour ce type de géométrie et le maillage testé. Les résultats présentés ci-dessous proviennent de simulations dont tous les paramètres ont totalement convergé jusqu'à 10^{-5} .



On remarque à nouveau que la pente de la courbe du facteur d'inconfort dans le passage est bien mieux simulée par le second ordre que par le premier ordre. De plus, dans ce cas-ci, le modèle de second ordre donne également une valeur de l'inconfort maximale différente de celle prédite par un calcul au premier ordre et nettement plus proche du résultat de référence donné par le test en tunnel à vent de Wiren. Enfin, il faut également noter que pour le modèle Reynolds Stress, l'utilisation du schéma de calcul du second ordre permet de faire passer les résultats d'une sous-estimation de l'inconfort à une très légère surestimation de l'inconfort, ce qui nous place du côté de la sécurité.

Les deux graphiques présentés ci-dessus montrent ostensiblement que les modèles de turbulence donnent des résultats nettement supérieurs lorsqu'on les fait converger au 2d ordre plutôt qu'au 1^{er} ordre. Il faut mentionner que les problèmes de convergence proviennent en général d'un maillage trop inhomogène. Avec un maillage hexahédrique fortement raffiné au niveau piéton et autour du bâtiment mais beaucoup plus grossier dans les zones écartées du modèle, des simulations de second ordre peuvent converger sans problème.

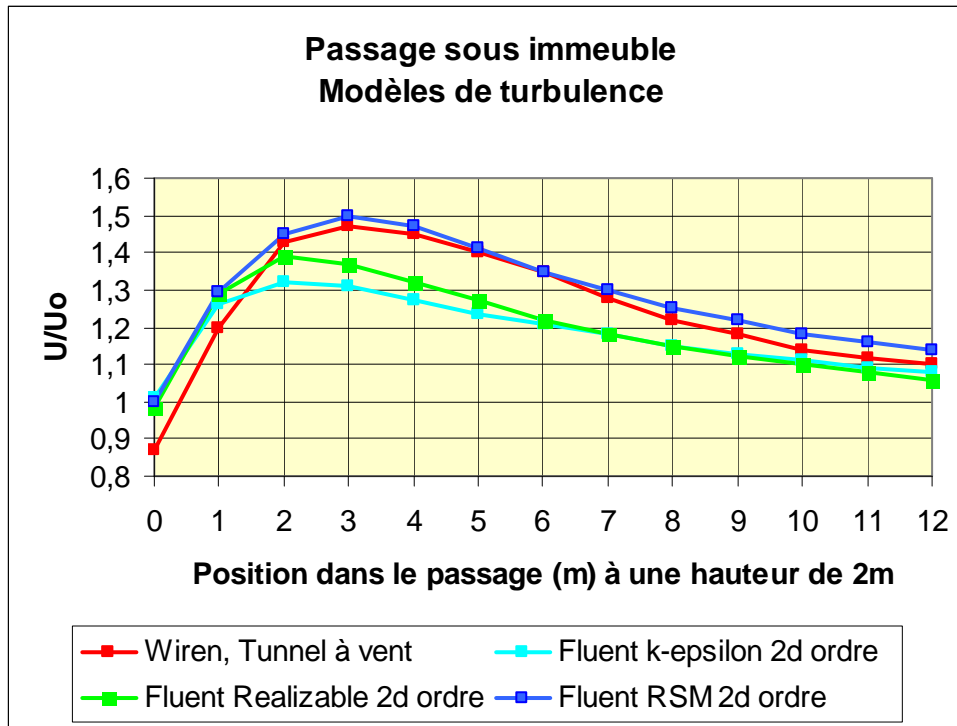
Le graphe suivant compare des simulations réalisées avec les différents modèles de turbulence (convergés au 2d ordre) et le test en tunnel à vent de Wiren.

Le modèle de turbulence k-epsilon standard ne donne pas un mauvais résultat dans ce cas, dans le sens où il permet de constater que le passage est un endroit inconfortable et que l'intensité maximale d'inconfort se situe dans le premier tiers du passage. L'estimation de la position de l'inconfort maximale est toutefois déplacée d'un mètre par rapport aux mesures en tunnel à vent et la valeur quantitative de l'inconfort est sous-estimée par rapport à l'inconfort réel. Cependant, ce modèle permet une première approximation des zones critiques de vent, en se rappelant qu'il a tendance à sous-estimer les accélérations du vent.

Le modèle k-epsilon Realizable améliore quantitativement l'estimation de l'inconfort par rapport au modèle k-epsilon standard. Toutefois ce modèle prédit la

position maximale d'inconfort avec la même erreur que le modèle k-epsilon standard et sous-estime également l'inconfort de manière générale.

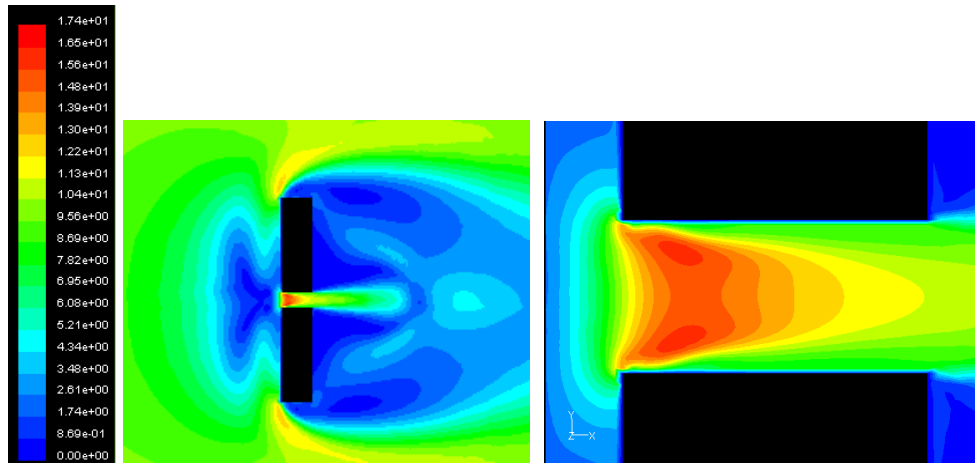
En revanche, le modèle Reynolds Stress (RMS) donne des résultats quantitatifs remarquables au niveau du confort des piétons dans les passages sous immeuble. Ce modèle permet non seulement d'identifier les zones critiques mais aussi d'observer précisément quelles sont les positions critiques et quelles sont les amplitudes d'inconfort probables.



Le modèle de turbulence RSM devrait donc être utilisé dans toutes les études du confort des piétons pour les zones critiques du vent car il donne de très bon résultat pour l'évaluation des distributions moyennes du vent. Cette conclusion vient valider le choix théorique que nous avons fait d'utiliser le modèle RSM dans toutes nos simulations du vent autour des bâtiments.

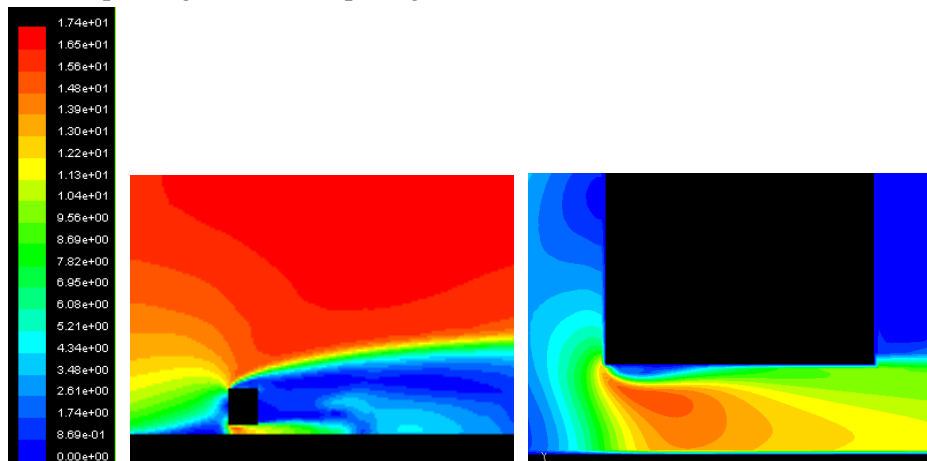
Il faut préciser que toutes nos simulations sont réalisées de manière stationnaire, c'est-à-dire sans tenir compte des fluctuations temporelles du vent. Pour prendre en compte la turbulence de manière plus précise, il faut utiliser un modèle instationnaire, idéalement un modèle de turbulence LES. De plus, signalons que des simulations temporelles permettraient d'évaluer l'amplitude spatiale des mouvements d'air autour de la solution moyenne donnée par le modèle stationnaire.

Les graphiques colorés ci-dessous donnent la répartition des vitesses de l'air à 2m du sol autour de ce bâtiment de 18m de haut avec trou sous immeuble, en fonction du profil de vent choisi par Wiren. Ils proviennent de nos simulations FLUENT réalisées à l'aide du modèle de turbulence RSM au second ordre. Le graphe de gauche présente l'écoulement général du vent autour du bâtiment et le graphe de droite est un agrandissement du passage sous le bâtiment. On voit bien les zones à faible vitesse de vent et les trois points critiques pour le confort des piétons à savoir les deux coins et le trou sous immeuble.



Plan : vitesses de l'air à 2m du sol et agrandissement au niveau du passage

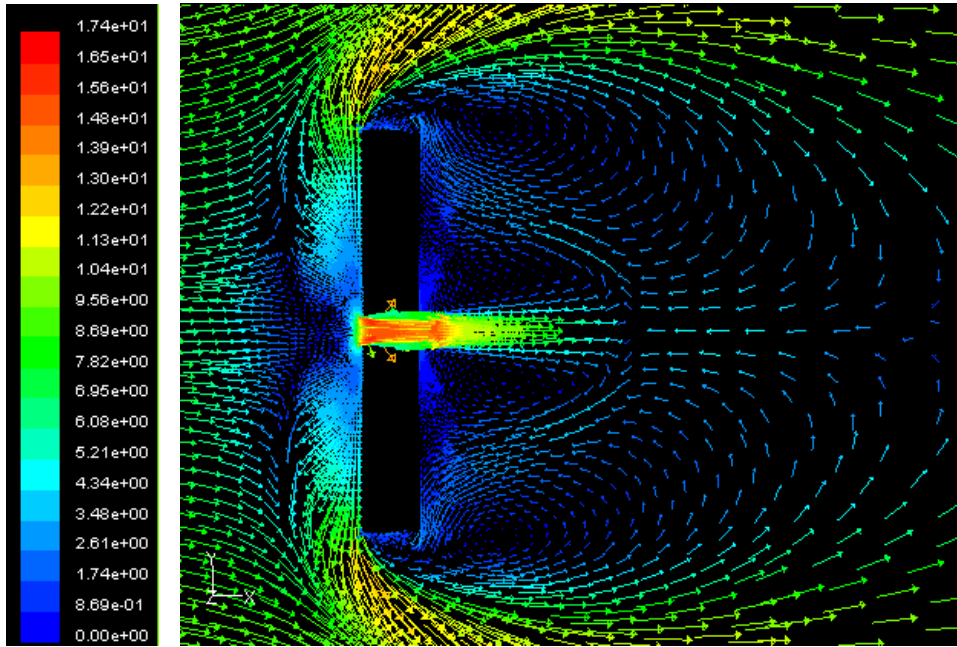
Le graphe suivant présente les répartitions des vitesses de l'air autour de ce bâtiment en coupe, au niveau du passage sous le bâtiment. On observe que le jet d'air se prolonge au-delà du passage.



Coupe : vitesses de l'air et agrandissement au niveau du passage

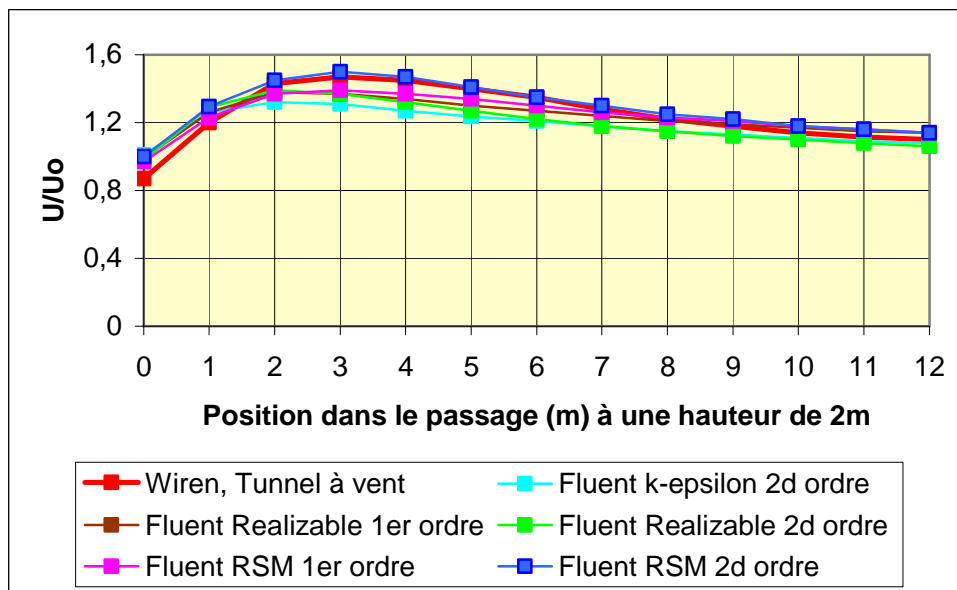
Les agrandissements au niveau du passage du plan et de la coupe donnés ci-dessus sont importants parce qu'ils montrent l'intérêt principal d'utiliser les simulations numériques pour comprendre les mouvements d'air autour des bâtiments, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. En effet, les simulations CFD donnent des résultats quantitatifs en chaque point du domaine simulé alors que les essais en tunnel à vent se limitent à la mesure d'un certain nombre de points prédéfinis. Ainsi, l'étude en tunnel à vent de Wiren portait sur le critère d'inconfort au vent au centre du passage sous immeuble et à une hauteur de 2m par rapport au sol. Mais les résultats de simulation présentés ci-dessus montrent qu'il ne s'agit pas de l'emplacement le plus critique au niveau du vent puisque les deux zones d'accélération maximale de la vitesse de l'air sont décentrées : l'endroit le plus critique est situé à 3m de l'entrée en longueur et 1.4m du centre en largeur. Bien sûr dans ce cas-ci les conclusions de l'étude ne seront pas très différentes, mais cela pourrait s'avérer crucial dans des situations géométriques complexes ou pour une orientation du vent non perpendiculaire au bâtiment. Cette remarque souligne l'avantage réel qu'offrent les simulations CFD au niveau de l'étendue des résultats quantitatifs générés par une seule simulation et de la compréhension des mécanismes des mouvements d'air autour des formes complexes.

Le graphe ci-dessous montre quant à lui une représentation graphique de l'écoulement de l'air autour de ce bâtiment à une hauteur de 2m du sol grâce aux vecteurs-vitesse. Il s'agit d'une représentation à la fois qualitative et quantitative des résultats de simulation CFD, éclairant la dynamique du processus de l'écoulement de l'air autour des bâtiments. Les simulations CFD sont donc véritablement un outil de compréhension des mouvements d'air.



Vecteurs vitesse

Si on représente l'ensemble de nos résultats de simulations pour ce premier cas test, sur une même échelle du rapport U/U_0 allant de 0 à 1.6, on voit que l'ensemble de ces résultats de simulation permettent de déterminer les zones d'inconfort pour les piétons avec une précision quantitative de la survitesse maximale de 15%, ce qui est largement suffisant pour estimer les zones critiques autour d'un bâtiment.

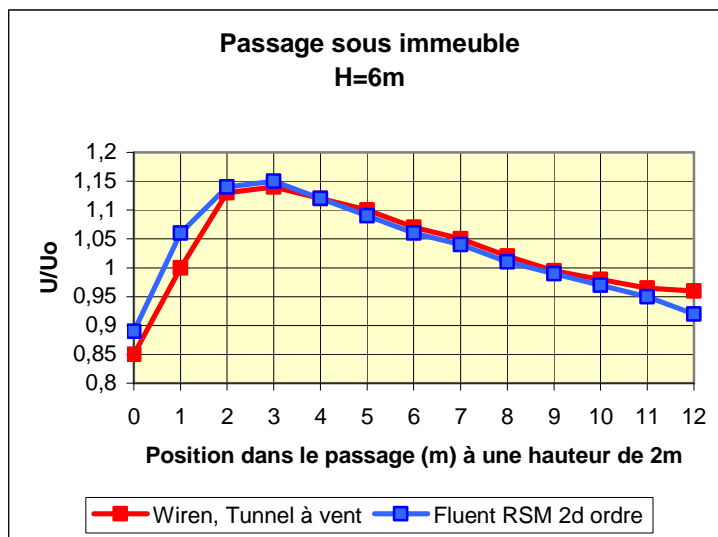


Tous les résultats de simulation sont bons à 15% près dans les passages sous immeuble.

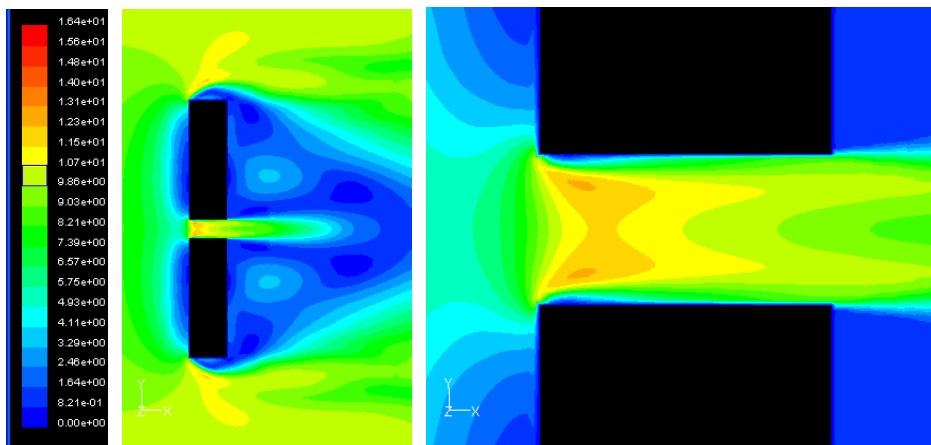
Cependant, pour une analyse poussée du comportement du vent au niveau piéton, de la position précise des zones de survitesses et d'une évaluation quantitative des risques d'inconfort rencontrés, certains modèles sont mieux adaptés. Nous recommandons l'utilisation du modèle de turbulence RSM au second ordre.

La même simulation a été réalisée pour un bâtiment de petite hauteur. Les valeurs quantitatives des survitesses du vent dans le passage sous un bâtiment de 6m de haut que nous avons obtenues à partir d'une simulation FLUENT à l'aide du modèle RSM au second ordre sont à nouveau comparées avec les résultats d'un test en tunnel à vent de Wiren. Les valeurs du test en tunnel à vent ont été simplifiées selon une courbe moyenne. Ces résultats présentent une équivalence tout aussi frappante que pour le bâtiment de 18m de haut.

Du point de vue quantitatif, le graphe ci-dessous montre que la simulation numérique donne des résultats remarquables par rapport à l'essai en tunnel à vent pour des mailles d'une précision de 0.2m au niveau du passage et de la face au vent du bâtiment. Ce maillage a été réalisé avec l'utilisation d'une symétrie, ce qui fonctionne très bien.



Les graphes suivants montrent que les mouvements d'air autour du bâtiment de 6 m de haut sont du même type que ceux autour du bâtiment de 18m de haut mais que le rapport U/U_0 a bien sûr fortement diminué et ne cause donc plus vraiment de zone critique au niveau des piétons.



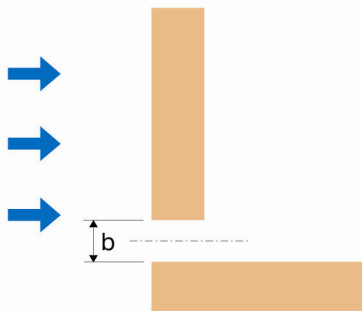
Plan des vitesses du vent à 2m du sol et agrandissement au niveau du passage.

Cette étude nous permet d'affirmer que le logiciel FLUENT est validé pour l'évaluation des mouvements d'air dans les passages sous immeuble. Vu qu'il s'agit d'un cas relativement complexe, au niveau géométrique et au niveau des flux d'air engendrés, nous estimons que la même méthodologie (domaine de simulation large, maillage important et raffiné au sol et le long du bâtiment, modèle de turbulence RSM au second ordre) restera a priori valable pour l'étude des différents effets critiques du vent autour de bâtiments isolés. De plus, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments.

4.2.2 Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un groupe de bâtiments

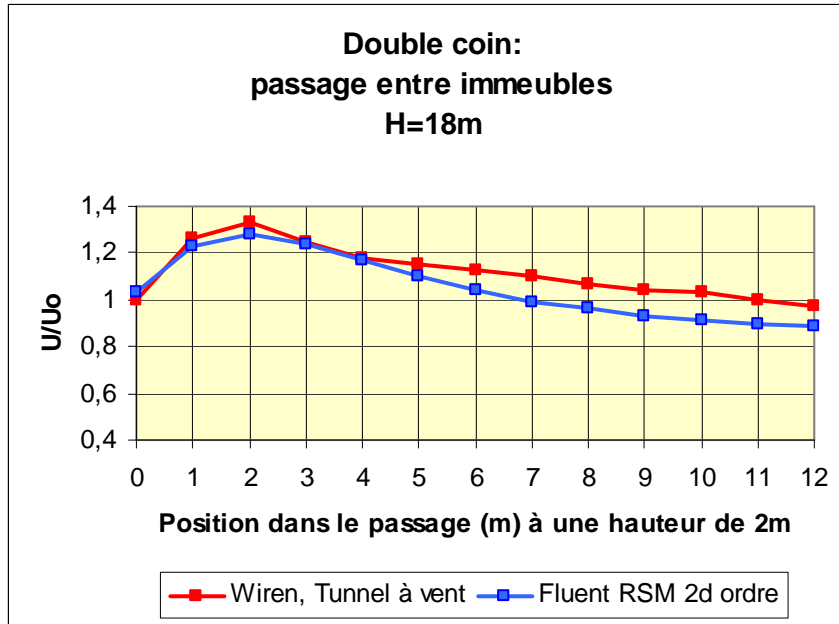
Les simulations suivantes étudient les mouvements d'air autour de **deux bâtiments** afin d'analyser si l'interaction entre bâtiments est également modélisée avec succès. Le choix porte sur des configurations qui ont été modélisées en tunnel à vent par Wiren afin d'avoir une base de comparaison.

La première configuration simulée consiste en deux bâtiments de 18m de haut perpendiculaires et séparés par un passage de 4m entre eux pour un vent perpendiculaire au front linéaire formé par les deux bâtiments. Les niveaux d'inconfort seront évalués au centre de l'espacement entre les deux bâtiments à l'aide du modèle RSM 2d ordre de Fluent et comparés avec les valeurs obtenues par Wiren par essai en tunnel à vent (Wiren 1975).

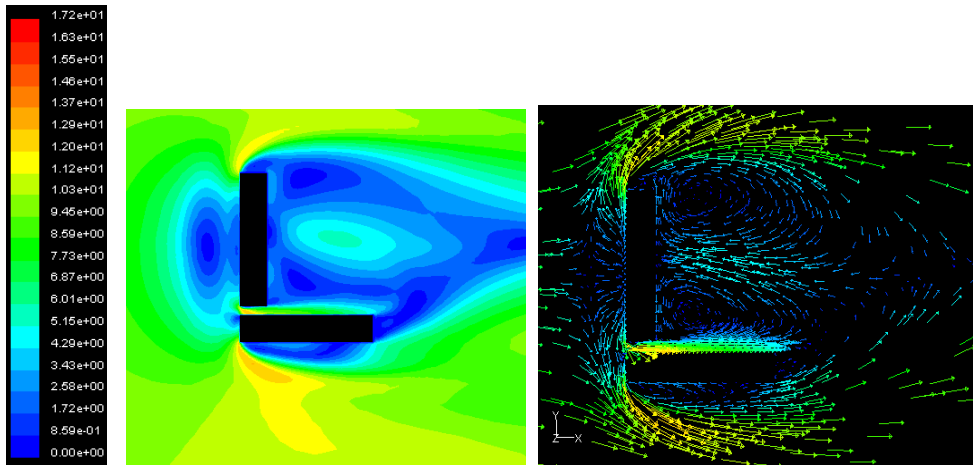


En nous basant sur les résultats obtenus pour l'analyse de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé, nous avons directement comparé une simulation réalisée avec le modèle de turbulence RSM au 2d ordre et le test en tunnel à vent de Wiren. Par contre, pour obtenir un maillage aussi homogène que pour les simulations autour d'un seul bâtiment, il est nécessaire d'agrandir les mailles les plus fines. La dimension minimale des mailles le long des façades au vent et du passage entre bâtiments correspond dans ce cas-ci à 0.5m de large. Ainsi, nous avons huit mailles sur la largeur du passage entre bâtiments. Cela semble a priori suffisant en fonction des recommandations de Franke & al. qui conseillent de placer au moins deux nœuds entre la limite du domaine (sol, bâtiment,...) et le point d'évaluation de la vitesse de l'air. (Franke & al. 2004)

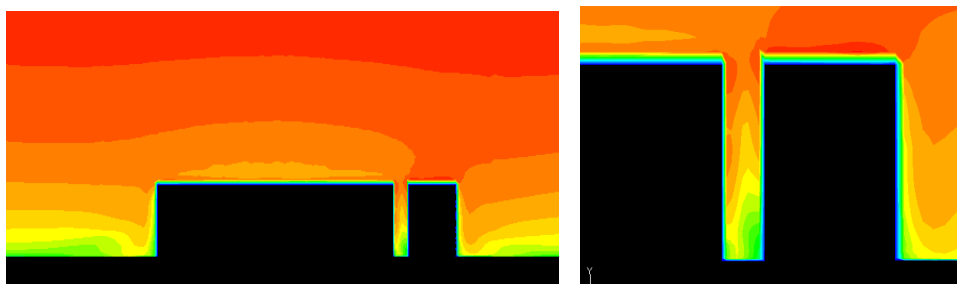
Le graphe ci-dessous donne les résultats respectifs de notre simulation et du test en tunnel à vent à 2 m de haut le long de la ligne médiane du passage entre bâtiments. Les résultats quantitatifs et qualitatifs de l'évaluation du rapport U/U_0 dans le passage sont de très bonnes qualités : la pointe de survitesse maximale est prédite avec une grande précision tant au niveau de son intensité que de sa position dans le passage et l'erreur entre les résultats simulés avec FLUENT et les valeurs du test en tunnel à vent reste comprise dans un intervalle de 15% maximum pour l'ensemble des vitesses situées dans le passage entre bâtiments.



Les schémas ci-dessous donnent l'écoulement horizontal du vent à 2m du sol à l'aide des courbes iso-vitesses et avec des vecteurs-vitesses montrant le mouvement du vent ainsi qu'une coupe et ses agrandissements au niveau du passage. Les plans et les coupes sont représentés avec la même échelle de vitesses du vent. Qualitativement, on peut voir que les simulations numériques offrent des vues rapides, intéressantes et très complètes des phénomènes d'écoulement d'air autour des bâtiments.

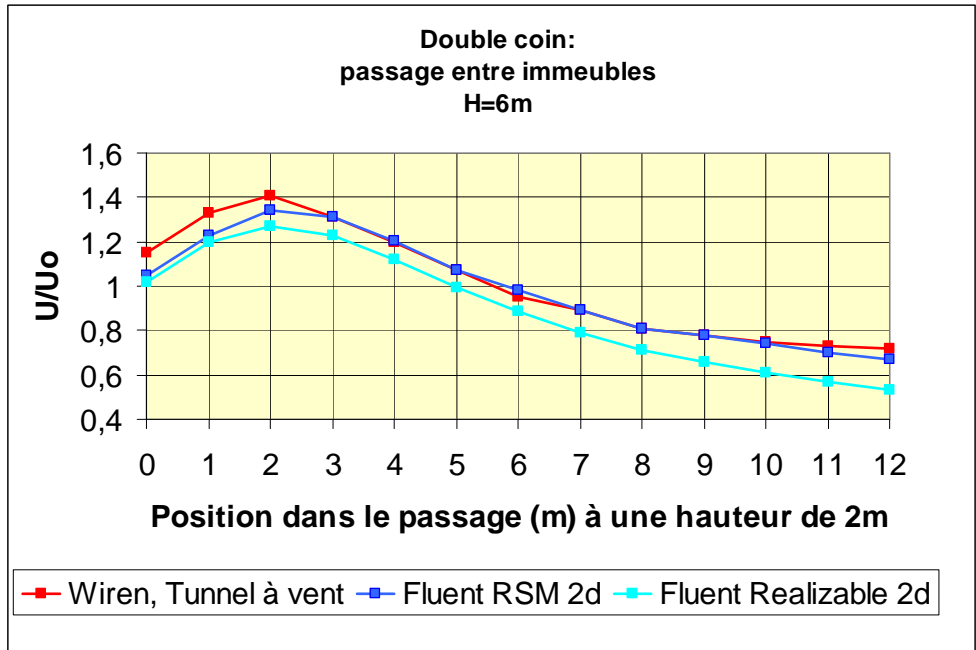


Vitesses de l'air en plan à 2m du sol : courbes iso-vitesses et vecteurs-vitesses.



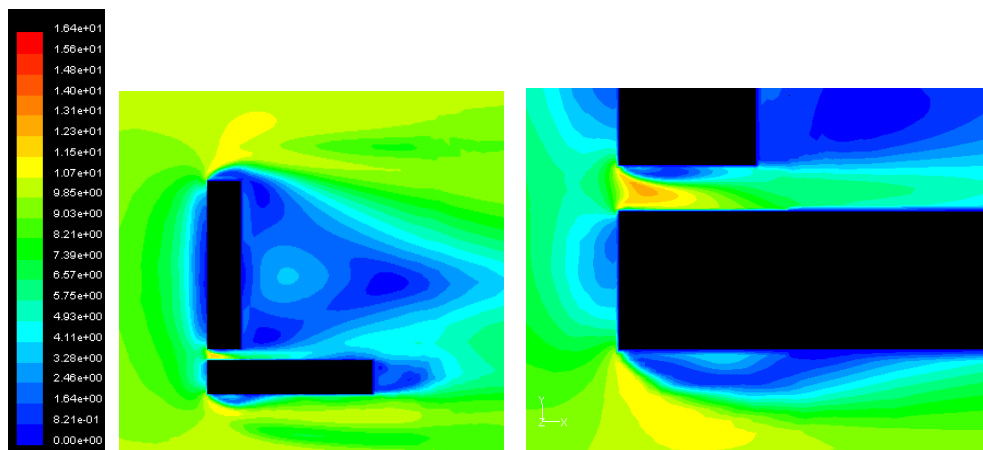
Coupe de la façade au vent des bâtiments et son agrandissement au niveau du passage.

Une seconde simulation est réalisée pour la même configuration de bâtiments et le même maillage (cellules de 0.5m de large) mais pour une hauteur des bâtiments de 6 m. Pour ce cas, nous avons à nouveau comparé une simulation RSM du 2d ordre avec une simulation k-epsilon réalisable du 2d ordre. Les résultats présentés dans le graphique ci-dessous montrent que la différence de résultats entre les deux modèles de turbulence est plus faible que pour un bâtiment isolé. Toutefois, les résultats restent meilleurs avec le modèle de turbulence RSM. Notre choix est donc réellement fixé au modèle RSM 2d ordre.



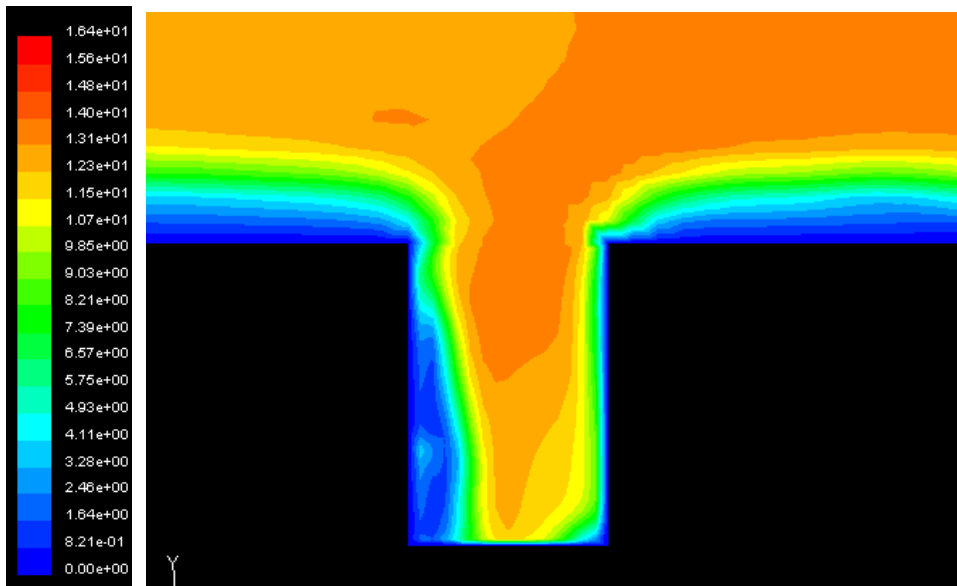
Dans ce cas-ci, on remarque à nouveau une excellente précision quantitative de l'évaluation des survitesses au niveau de la pointe de vitesse maximale et une erreur globale qui reste inférieure à 15% sur l'ensemble du passage pour le modèle k-ε réalisable et à 10% pour le modèle RSM. De plus, la position de la pointe des survitesses est localisée à l'endroit exact où elle se produit.

Les graphes ci-dessous montrent les résultats qualitatifs de la simulation du vent autour de bâtiments de 6m de haut, avec les mailles de 0.5m de large, pour le modèle RSM 2d ordre.



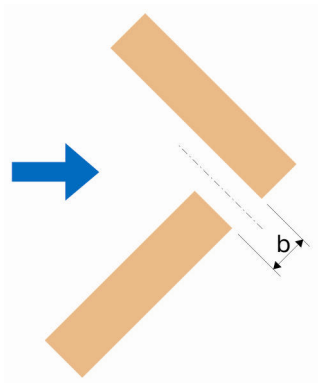
Vitesses de l'air à 2m du sol et agrandissement du plan au niveau du passage.

La coupe ci-dessous réalisée dans le passage à 2m de l'entrée montre qu'il s'y produit un gradient de vitesses très élevé et nettement plus marqué au niveau piéton que pour des bâtiments de 18m de haut. Cette constatation est très importante car elle induit un inconfort accru pour les piétons.

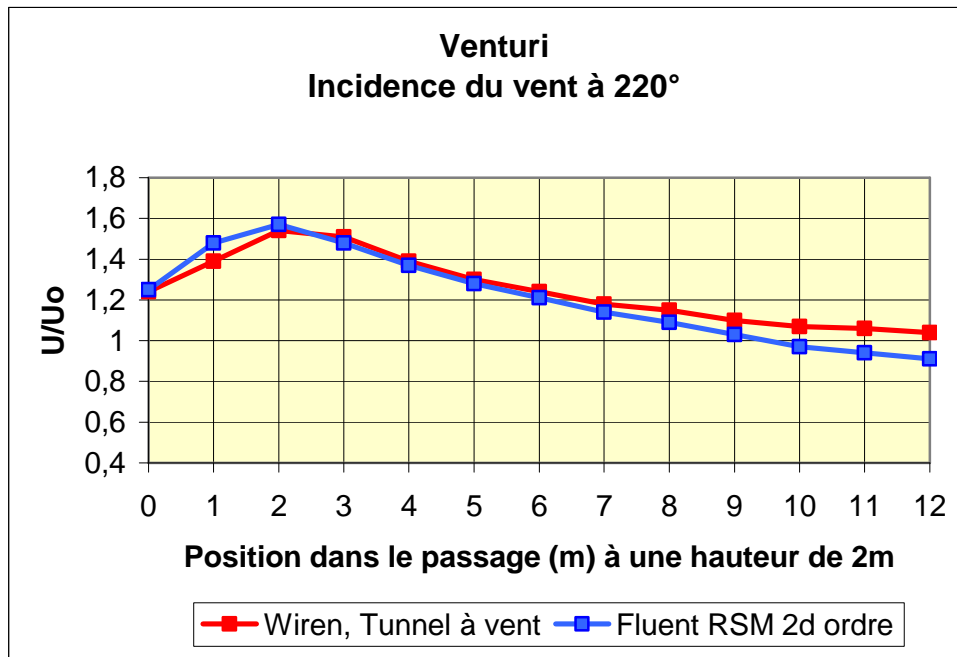


Vitesses du vent en coupe à l'intérieur du passage entre bâtiments (à 2m de l'entrée).

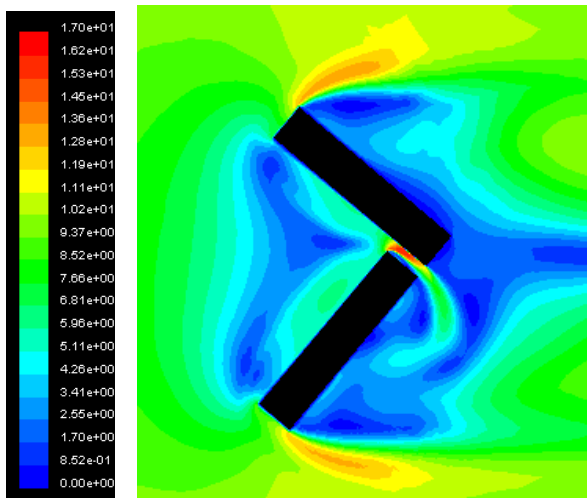
Une seconde configuration a été testée pour la validation de FLUENT comme outil d'évaluation du vent autour de groupes de bâtiments ; il s'agit de l'effet Venturi, représenté ci-dessous. Les bâtiments ont une hauteur de 18m et le passage une largeur de 4m. Il s'agit en fait de la même configuration que précédemment mais pour une incidence de vent de 220°.



Les résultats sont remarquables pour l'effet Venturi, simulé avec le modèle de turbulence RSM 2d ordre et un maillage de 0.5m de côté autour des bâtiments et dans le passage.



Le graphique ci-dessous présente les vitesses de l'air en plan à 2m du sol dans le cas de cette configuration connue pour créer l'effet Venturi. On voit bien que la zone du passage est bien la zone la plus critique mais que les effets de coin de part et d'autre de l'ensemble construit ne doivent pas être négligés pour autant.



En résumé, l'erreur maximale atteinte entre les tests en tunnel à vent et les simulations numériques de groupes de bâtiments est inférieure à 15% en tout point des passages entre bâtiments quelque soit leur hauteur et elle n'est que de quelques pourcents pour la pointe maximale des survitesses. De plus, la position de la survitesse maximale est très bien simulée.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour d'un groupe de bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour des ensembles de quelques bâtiments.

Cette étude a également montré qu'une taille des cellules du maillage de 0.5m de large au niveau des façades au vent et des zones critiques de l'écoulement est suffisante pour évaluer le confort des personnes autour de groupes de bâtiments.

Ces simulations ont également confirmé que le modèle RSM convergé au second ordre est le modèle de turbulence idéal pour l'étude du vent autour des constructions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments et qu'il est particulièrement utile plus pour l'analyse en trois dimensions des zones où le flux est instable, présente de forts gradients ou des décrochements.

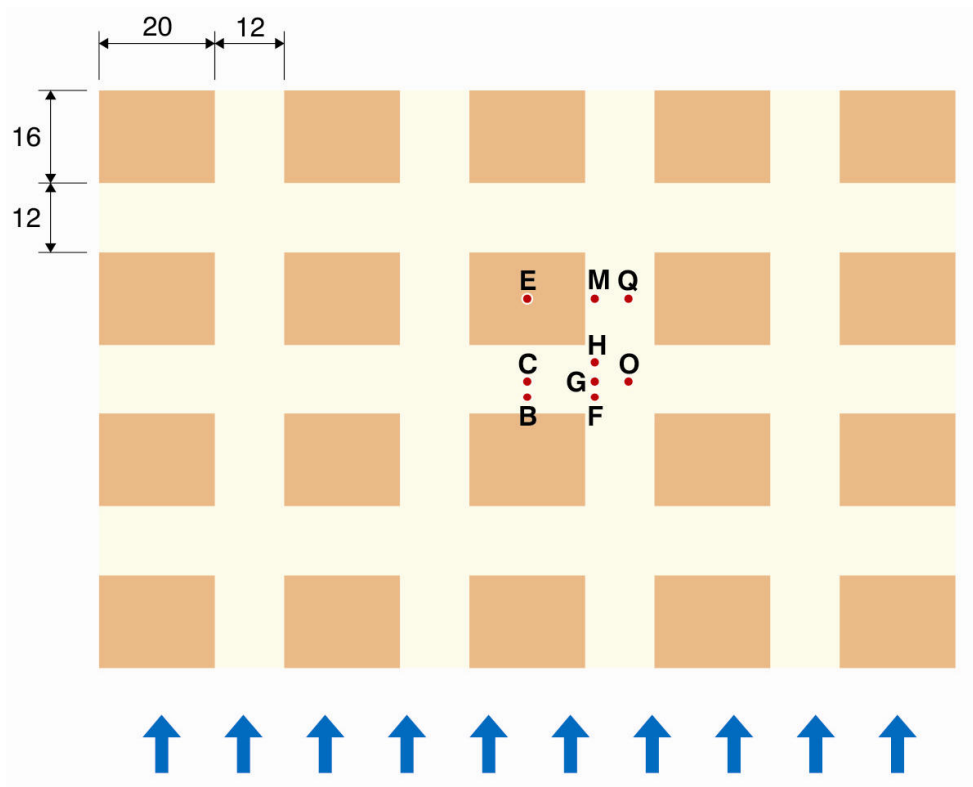
4.2.3 Validation de FLUENT pour l'étude du vent dans un tissu urbain dense

Cette partie consiste à tester la validation des simulations CFD avec Fluent au calcul d'un ensemble urbain. Il s'agit de vérifier le domaine d'application et la précision des évaluations du logiciel FLUENT comme outil de simulations de l'écoulement du vent en ville.

Malgré l'importance fondamentale de l'étude des mouvements d'air en milieu urbain dense, les profils de vent y ont été très peu étudiés jusqu'à présent. Nous nous concentrons dans cette section sur la validation des simulations FLUENT par rapport à une situation urbaine afin de pouvoir juger de l'utilité concrète de cet outil numérique pour l'analyse des vitesses moyennes du vent dans un milieu urbain dense.

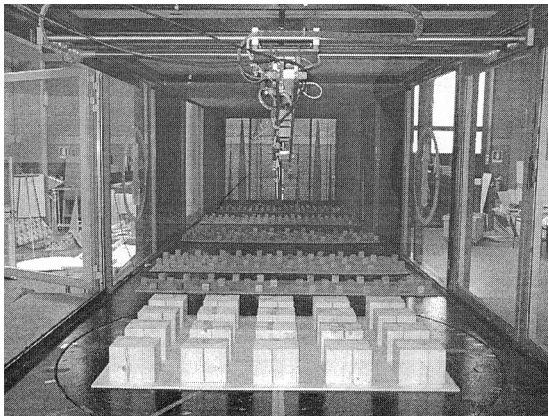
Notre validation est basée dans un premier temps sur une comparaison entre nos simulations numériques réalisées à l'aide de FLUENT et les essais en tunnel à vent de Ricciardelli et Polimeno sur vingt blocs de bâtiments de hauteur homogène et dont le rapport H/W vaut 1.25 (Ricciardelli & Polimeno 2004). Il s'agit donc typiquement d'une situation où les rues perpendiculaires au vent induiront un flux séparé (« skimming flow »), ce qui est le cas de nombreux centre-villes traditionnels.

Mes simulations numériques reprennent la géométrie et le profil de vent utilisés pour les tests en tunnel à vent de Ricciardelli et Polimeno. Les schémas ci-dessous montrent la disposition des vingt blocs de bâtiments et les points de référence pour l'étude quantitative des mouvements d'air. Les bâtiments ont une largeur au vent de 20m, une hauteur de 15m et une profondeur de 16m ; ils sont séparés les uns des autres par des rues de 12m de large dans les deux directions. Les points de référence étudiés quantitativement sont le point C au centre d'une rue perpendiculaire au vent, le point O au centre du carrefour et le point Q au centre d'une rue parallèle au vent. Les points C et O sont situés entre la deuxième et la troisième rangée de bâtiments alors que le point Q est placé au niveau de la moitié de la profondeur de la troisième rangée de bâtiments. Le profil de vent utilisé est le suivant : $U_z = 7.5 (z/15)^{0.28}$ avec une intensité de turbulence de 13% à 15m de haut.



(Ricciardelli & Polimeno 2004).

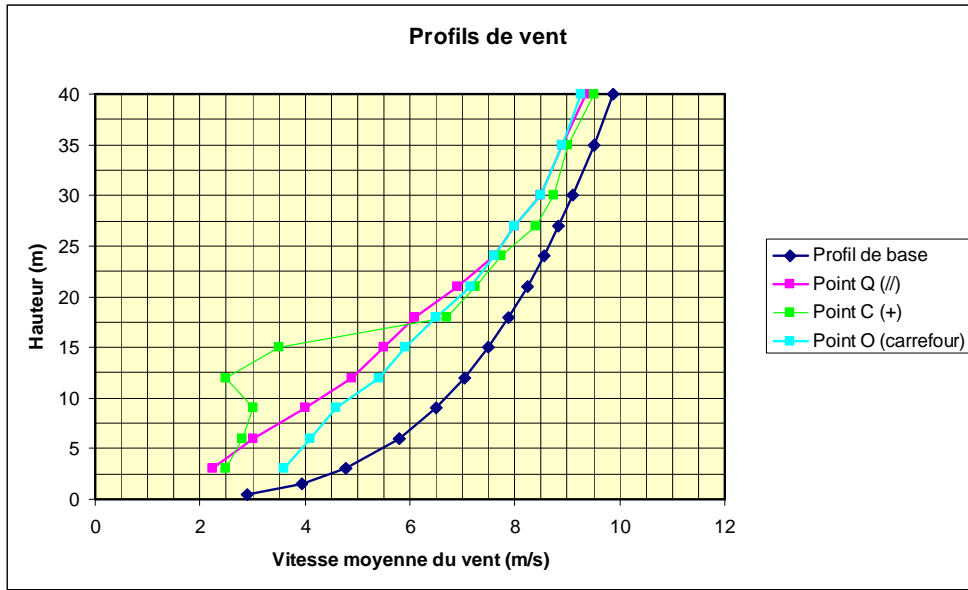
La photo ci-dessous montre la maquette testée et le tunnel à vent CRIACIV d'où ont été tirés les résultats par rapport auxquels nous comparons nos simulations numériques.



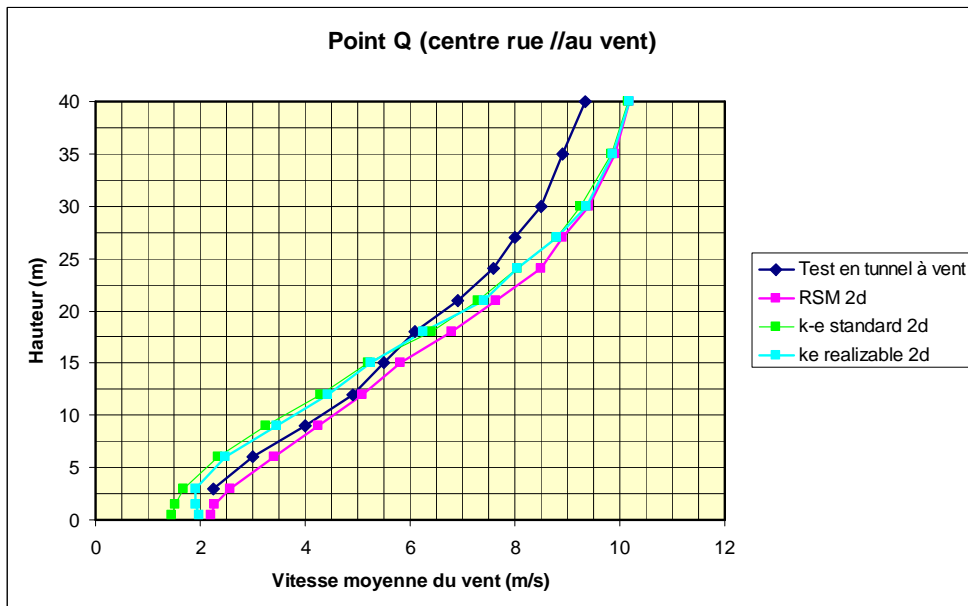
(Ricciardelli & Polimeno 2004).

Les tests en tunnel à vent montrent qu'il y a deux types de profils du vent très différents : le premier se trouve dans les rues parallèles au vent et le second dans les rues perpendiculaires au vent. Les rues parallèles au vent (y compris au niveau du carrefour) présentent un profil qui varie de manière pratiquement linéaire avec la hauteur. Les profils de vent correspondant aux rues perpendiculaires au vent présentent une coupure importante juste en-dessous des toits et des vitesses de l'air plus lentes et assez constantes sur toute la hauteur du canyon. En revanche, l'amplitude de la vitesse du vent au niveau piéton semble relativement homogène sur l'ensemble du tissu urbain. Le rapport U/U_0 reste inférieur à 0.8 à une hauteur de 3m au-dessus du sol pour l'ensemble des points étudiés, ce qui démontre l'effet de protection de ce tissu urbain par rapport au vent.

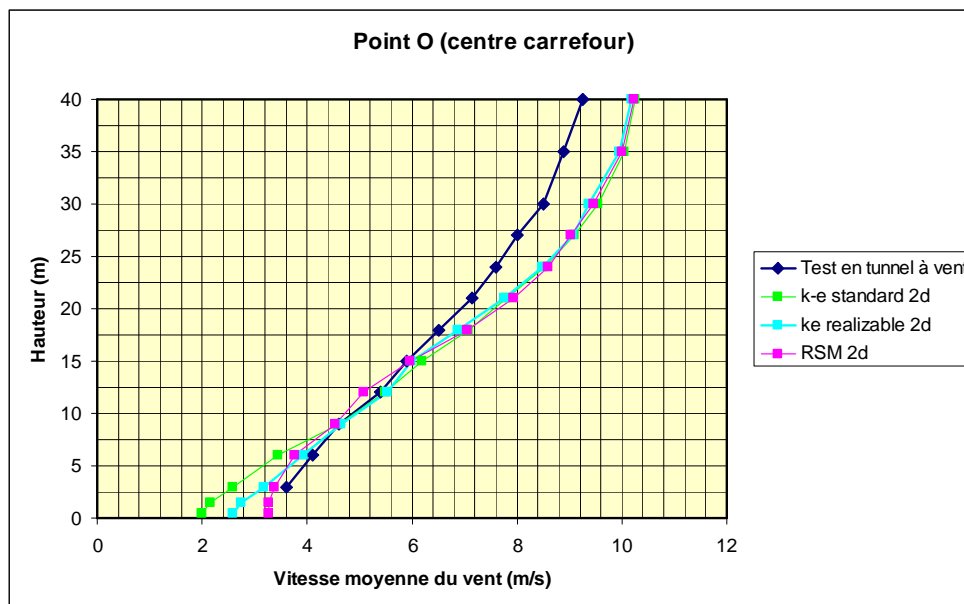
Les résultats des profils de vent mesurés en tunnel à vent sont présentés dans le graphe ci-dessous.



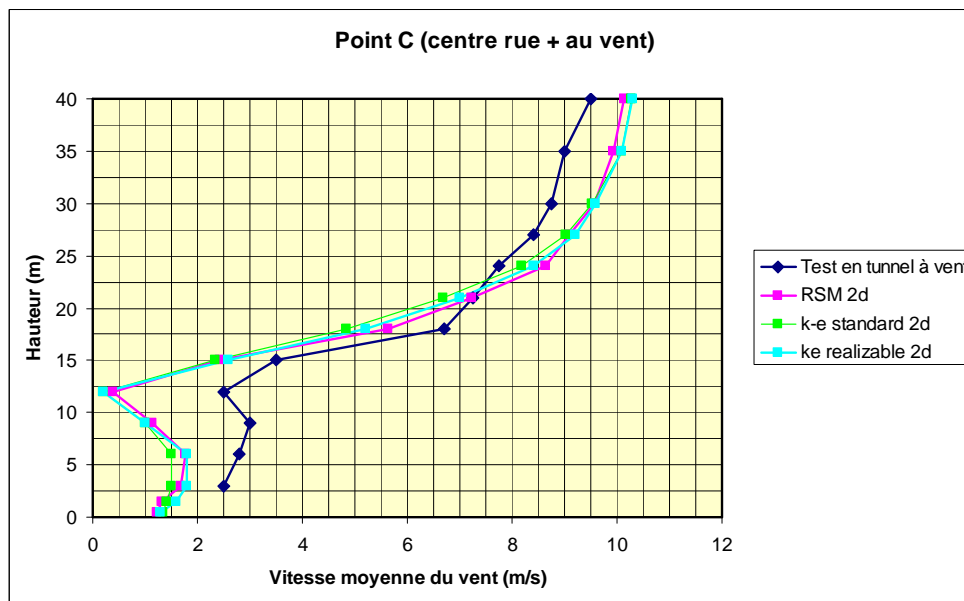
Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point Q, situé au centre de la rue parallèle au vent.



Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point O, situé au centre du carrefour.



Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point C, situé au centre de la rue perpendiculaire au vent.



Nos simulations numériques convergées au 2d ordre montrent que tous les modèles, même le k-ε standard permettent de prédire la forme générale du profil de vent pour les rues parallèles au vent ainsi que la coupure à une hauteur de 12.5m pour des bâtiments de 15m de haut dans le profil de vent des rues transversales. Par contre, la diminution de la vitesse de l'air au niveau des toits à l'endroit de l'inversion du flux d'air est fortement surestimée dans les trois modèles standards.

Au niveau de l'évaluation quantitative des vitesses de l'air à 3m de haut, le modèle RSM standard semble donner des résultats un tout petit peu plus proches des tests en tunnel à vent que le modèle k-ε réalisable mais nettement supérieurs à ceux du modèle k-ε standard.

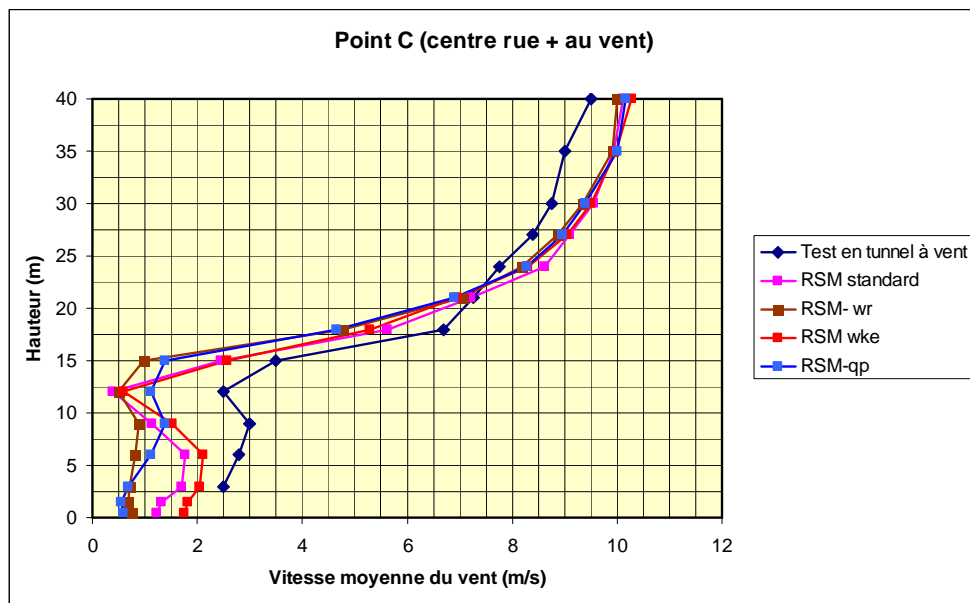
Selon les tests en tunnel à vent, les vitesses du vent mesurées à 3 m de haut dans ce tissu urbain sont comprises entre 1.5m/s et 4m/s et pour les trois points étudiés plus spécifiquement dans cette thèse (Q, O et C) on a 2.25 m/s, 3.75 m/s et 2.5 m/s. Nos simulations numériques donnent les valeurs suivantes à 3m du sol pour ces trois points d'évaluation (Q, O et C) :

- 1.65 m/s, 2.6 m/s et 1.5 m/s pour le modèle k-ε standard, au 2d ordre
- 1.85 m/s, 3.2 m/s et 1.85 m/s pour le modèle k-ε réalisable, au 2d ordre
- 2.55 m/s, 3.35 et 1.75 m/s pour le modèle RSM standard au 2d ordre.

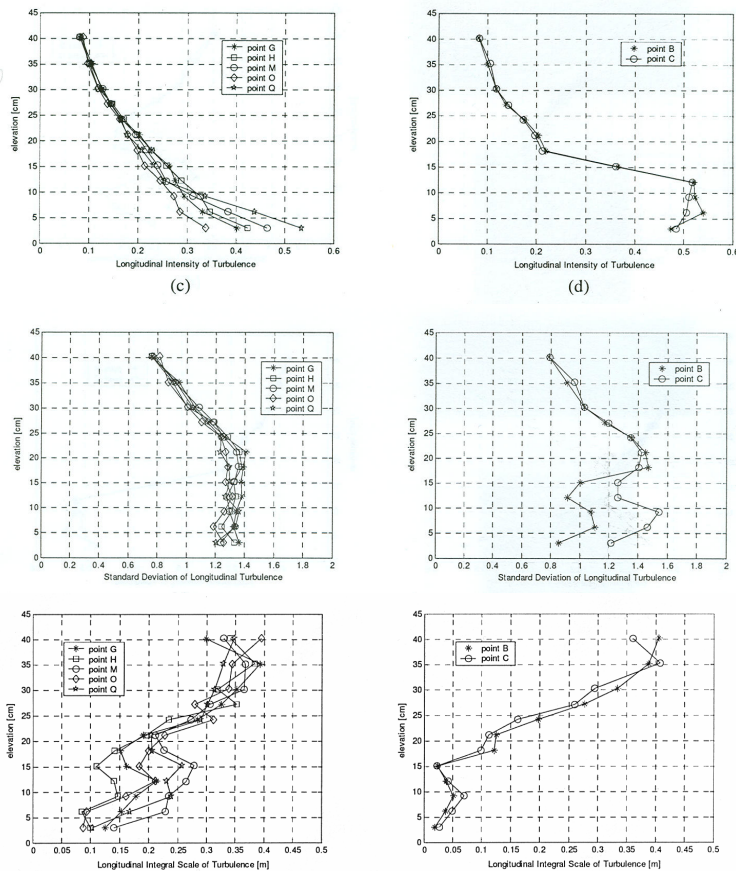
On peut en conclure que d'un point de vue quantitatif à 3m de haut le modèle k-ε réalisable et le modèle RSM semblent donner des résultats plus ou moins équivalents pour ce type de tissu urbain. L'erreur commise par nos simulations sur les vitesses de l'air au niveau de 3m de haut varie :

- pour les profils de vent dans les rues parallèles au vent entre 13% pour le modèle RSM standard et 18 % pour le modèle k-ε réalisable, tous deux convergés au 2d ordre.
- pour les profils de vent dans les rues perpendiculaires au vent (sauf les carrefours) entre 26 % pour le modèle k-ε réalisable et 30% pour le modèle RSM standard.

Pour le dernier cas (point C, au centre de la rue perpendiculaire au vent), les résultats ont également été comparés entre le test en tunnel à vent et les différents paramètres du modèle RSM 2d. On voit qu'il est possible de légèrement améliorer la vitesse de l'air au niveau piéton en utilisant le paramètre « Wall B.C. from k Equation » (c.à.d. wall boundary conditions for the Reynolds stresses from de k equation) mais ce résultat ne concerne qu'un point spécifique ce qui ne nous permet pas d'en assurer la validité sur l'ensemble du tissu urbain. Par ailleurs, les paramètres « wall reflection effects » et « Quadratic pressure-strain model » améliorent la verticalité du profil de vent à l'intérieur du canyon mais y soustiment fortement la vitesse moyenne de l'air à ce point spécifique.



Cet article de Ricciardelli et Polimeno étudie également la turbulence dans les rues en milieu urbain dense. (Ricciardelli & Polimeno 2004).



(Ricciardelli & Polimeno 2004).

Malheureusement ce type de profils de turbulence ne peut pas être obtenu avec une simulation CFD avec assez de précision... En effet, le modèle RSM ne permet pas d'évaluer précisément la structure de turbulence car il a été créé pour valoriser la vitesse moyenne. Nous allons donc résumer les résultats de Ricciardelli et Polimeno.

Dans le canyon parallèle au vent, l'intensité de turbulence est maximale à proximité du sol. Pour une hauteur de 3m, l'intensité de turbulence est comprise entre 0.34 et 0.54 alors qu'elle vaut 0.17 sans les bâtiments. Cet intervalle assez large ne provient pas de la variabilité du paramètre σ mais bien des modifications de la vitesse moyenne du vent. Dans les rues parallèles au vent, la variabilité de la vitesse RMS n'est que de 15%, alors que la variabilité de l'intensité de turbulence est de 50%. Dans les rues perpendiculaires au vent, l'intensité de turbulence est plus élevée mais plus constante que dans les rues parallèles au vent. On y trouve en général des valeurs d'intensité de turbulence de 0.47 à 0.54. On pourrait donc choisir une intensité de turbulence moyenne de 0.45 pour les rues parallèles au vent et de 0.5 pour les rues perpendiculaires au vent, dans ce type de tissu urbain dense.

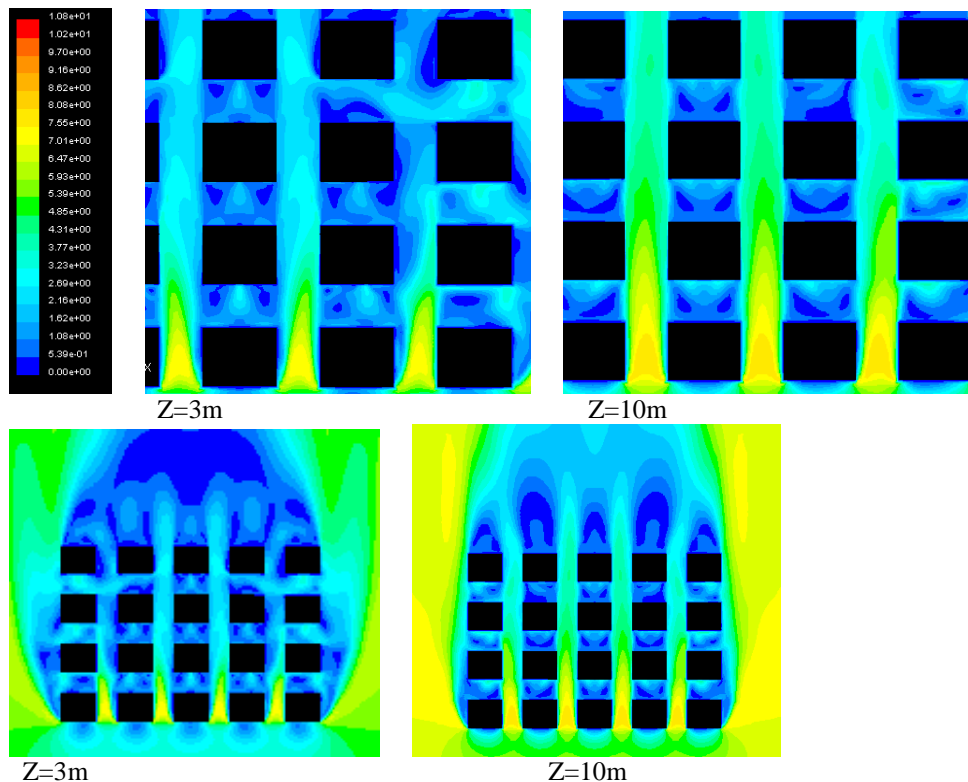
Même si la comparaison détaillée des critères de confort par rapport au vent montre que théoriquement il serait idéal de prendre en compte la turbulence, le manque de données accessibles sur les niveaux de turbulence autour des bâtiments et la grande difficulté à modéliser ou à mesurer précisément ce type de paramètres pour un très grand nombre de cas variés, nous incite actuellement à promouvoir en première approche un critère de confort simplifié basé uniquement sur la vitesse moyenne du

vent ($U \leq 5\text{m/s}$), ce qui simplifie son évaluation et donne des résultats plus uniformes pour les différents utilisateurs et plus facilement compréhensibles pour les différents acteurs intervenant dans les projets urbains. A long terme, bien entendu, il serait idéal de développer une connaissance précise de la turbulence locale en milieu urbain mais elle reste encore difficilement modélisable à l'heure actuelle.

Pour les rues perpendiculaires au vent, le flux d'air intérieur au canyon interagit relativement peu avec l'air au-dessus des toits, ce qui ne permet pas d'évacuer de manière significative la pollution générée (voitures,...) dans ce type de rues.

Cependant, une étude réalisée en comparant des tests en tunnel à vent et des mesures sur site réel a investigué l'influence du trafic sur la vitesse moyenne de l'air et sur ses composantes de turbulence. Une conclusion essentielle de cette étude est qu'on trouve une concentration de polluants plus faible dans le cas d'un trafic sur deux bandes en sens inverse que si la même pollution était générée sans le mouvement des voitures. En fait la composante de vitesse de l'air dans le sens du canyon est fortement dépendante du trafic, alors que la composante de vitesse perpendiculairement à l'axe de la rue reste inchangée. Le cas d'un trafic à deux bandes induit une intensité de turbulence nettement plus élevée que dans un canyon vide (Kastner-Klein & al. 2001).

Les graphiques ci-dessous présentent la distribution des vitesses du vent à 3 m et à 10m de haut selon nos simulations FLUENT avec le modèle RSM standard convergé au second ordre. La même échelle des vitesses est valable pour tous les graphiques. Le vent provient du bas de la feuille. Signalons toutefois que ces simulations donnent des résultats moyens qui ne rendent donc pas compte de l'amplitude dynamique des mouvements d'air réels. Il serait donc extrêmement intéressant de réaliser dans le futur des simulations dynamiques afin de pouvoir mettre en évidence les cycles temporels des écoulements qui se produisent autour des bâtiments.



Ici encore, la perception de la répartition des vitesses sur l'ensemble du domaine de simulation nous semble un grand avantage par rapport à la mesure limitée à des points précis pour les tests en tunnel à vent.

Cette section de notre thèse montre que l'effet de protection du vent au niveau piéton dans un tissu urbain dense est bien modélisé par le logiciel FLUENT. Même si les valeurs quantitatives de la vitesse moyenne de l'air à 3m de haut sont plus éloignées des résultats du test en tunnel à vent (différence de 20 à 30% pour un modèle RSM convergé au 2d ordre selon les paramètres de simulation utilisés) que dans le cas de la simulation du vent autour d'un bâtiment isolé et d'un groupe de bâtiments (erreur inférieure à 15%), cette incertitude concerne de faibles vitesses de vent, ce qui n'est pas gênant pour l'étude du confort des personnes à l'extérieur.

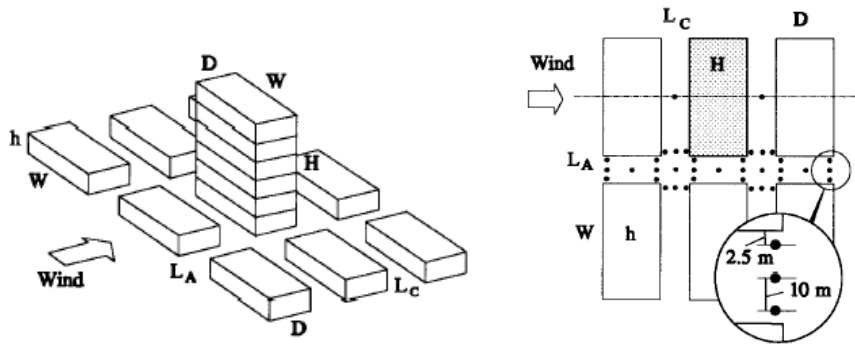
Ce n'est pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point qui nous intéresse mais la possibilité de prévoir, dans le tissu urbain, les zones où telle ou telle activité est possible et les impacts que la morphologie urbaine induit sur la possibilité de créer des espaces publics confortables. C'est donc du point de vue des architectes que nous estimons que les simulations numériques CFD sont bien validées pour évaluer le confort piéton lié au vent et analyser les conséquences de leurs choix de conception sur le microclimat local.

Par contre, cette validation de FLUENT pour l'étude du vent autour des bâtiments montre qu'il est très difficile d'obtenir une bonne modélisation du profil exact de l'air dans les rues perpendiculaires au vent associé à une évaluation correcte de la vitesse du vent au niveau piéton. Pour des études telles que la ventilation naturelle des bâtiments nous conseillons de garder une vitesse de l'air constante sur toute la hauteur du canyon, tout en modélisant la vitesse de l'air au niveau piéton à l'aide du modèle RSM standard. Signalons toutefois que cette étude s'est basée sur trois points ponctuels. Une seconde étude sera donc réalisée pour analyser la répartition des vitesses de l'air de manière moyenne sur l'ensemble de plusieurs rues à une hauteur plus proche du sol. Nous pourrions donc tester de manière plus globale l'utilisation des paramètres « wall reflection effects » et « Quadratic pressure-strain model » qui améliorent la verticalité du profil de vent à l'intérieur du canyon.

Une **seconde étude de validation** a été réalisée pour comparer les résultats de nos simulations FLUENT au sein d'un morceau de **tissu urbain** avec des essais réalisés en soufflerie aérodynamique sur la même configuration bâtie. Cette étude analyse la répartition des vitesses dans un milieu urbain dense dans un plan horizontal situé à 2m du sol.

Cette seconde vérification est basée sur les tests en tunnel à vent de Stathopoulos et Wu. Ces expériences en tunnel à vent ont été réalisées avec un profil de vent moyen de type urbain ($a=0.25$) qui est également utilisé dans nos simulations. Nous avons choisi la référence $U_{10\text{météo}} = 5\text{m/s}$ et 14% d'intensité de turbulence au sol. La vitesse de référence à 2m du sol est $U=2.08\text{m/s}$.

Les dessins ci-dessous montrent la configuration étudiée pour cette seconde validation et la position des différents points de mesure dans le test en tunnel à vent (Stathopoulos & Wu 1995). Le bâtiment central a été modélisé selon deux hauteurs différentes : la même hauteur que l'ensemble du tissu urbain (19m) et une hauteur égale à quatre fois la hauteur des bâtiments environnants (76m). Les rues présentent une largeur de 25m et les bâtiments périphériques une hauteur de 19m, une largeur (face au vent) de 100m et une profondeur (parallèlement au vent) de 50m.

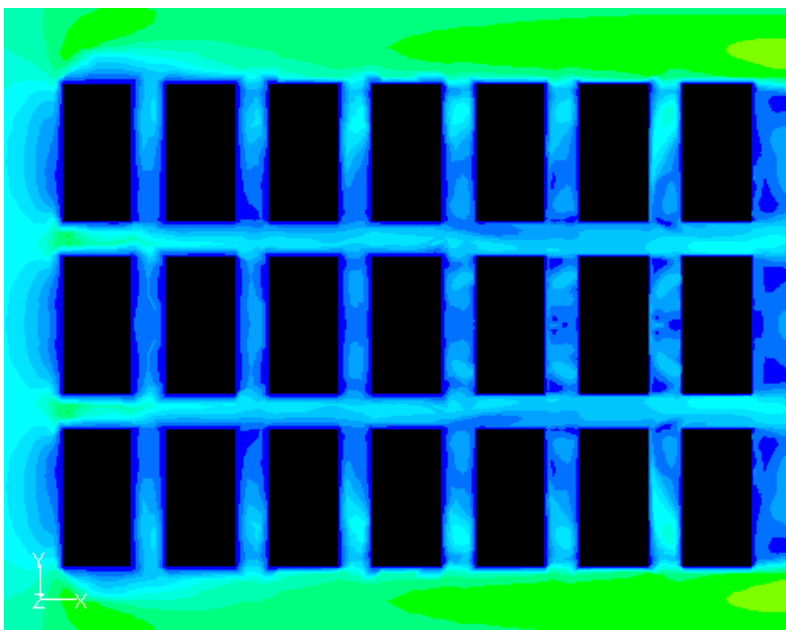


Arrangement des bâtiments et distribution des points de mesure. (Stathopoulos & Wu 1995)

Nous avons réalisé des simulations numériques de cet ensemble urbain avec FLUENT. Le domaine de nos simulations a été déterminé à partir des règles découvertes précédemment dans cette thèse :

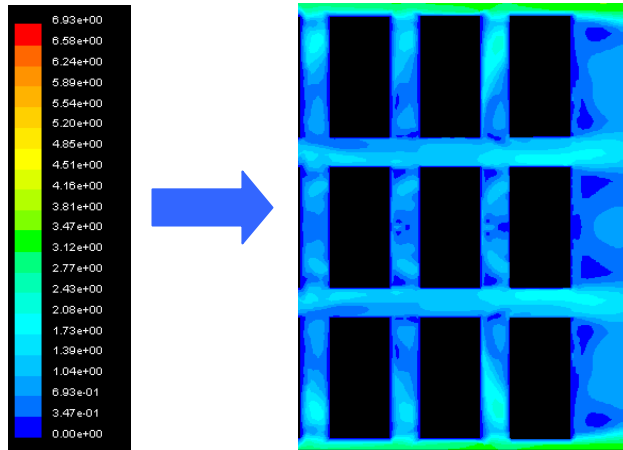
- utilisation de la symétrie pour limiter le domaine de moitié. Le domaine est donc constitué de 1.5 blocs en largeur et 3 blocs en longueur.
- rapport de blocage = 2.5%, ce qui est bien inférieur à 3%. De plus, la forme de la surface d'entrée de l'air respecte la forme de la face au vent du tissu urbain pour des hauteurs de bâtiments identiques.
- espace libre avant le groupe de bâtiment d'une longueur égale à $10h$ où h est la hauteur des bâtiments du tissu urbain ($h=19\text{m}$).
- espace libre après l'ensemble de bâtiments d'une longueur égale à $16h$.
- hauteur du domaine égale à $5H$ où H est le bâtiment élevé, qui vaut dans ce cas-ci $4h$ (où h est la hauteur des bâtiments peu élevés).

Attention ces simulations présentent 4 blocs supplémentaires dans la direction du vent en amont des trois blocs étudiés. Ceci a été réalisé afin de définir un milieu urbain ainsi que de correspondre au mieux à l'essai en tunnel à vent de Stathopoulos et Wu puisque ceux-ci l'ont également fait dans leur essai en tunnel à vent bien qu'ils n'aient pas représenté ces blocs dans les résultats graphiques qu'ils rapportent. Il y a donc 300m de terrain urbanisé (4x un bâtiment de 50m de profondeur + 4 fois une rue de 25m de large) avant les bâtiments analysés. Le graphe ci-dessous montre l'ensemble des bâtiments simulés.

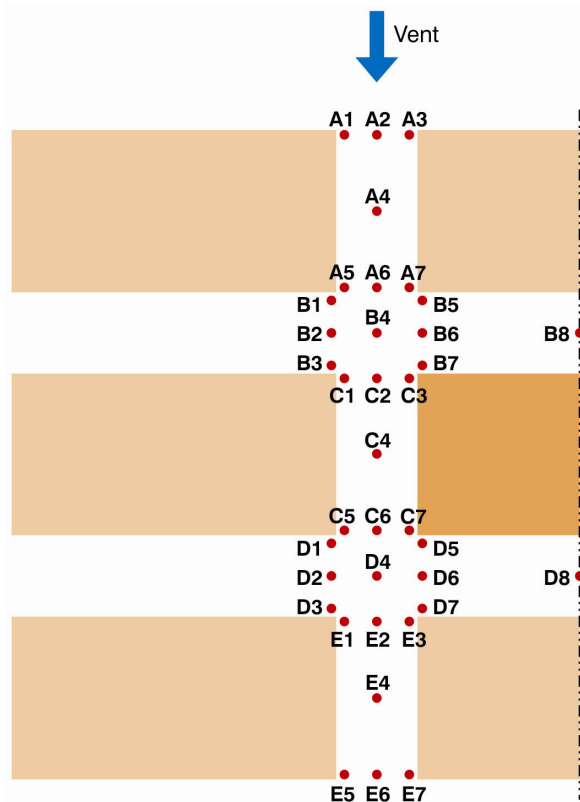


Au niveau du maillage, une hauteur de 0.5 m a été choisie du sol jusqu'à 40m de haut. Par contre, le maillage est nettement moins précis dans le plan horizontal où les mailles sont de 2mx2m dans la zone d'analyse des vitesses de vent. Le maillage comprend environ deux millions de cellules.

Le graphe ci-dessous montre la répartition des vitesses de vent simulées par FLUENT dans ce complexe urbain à 2m du sol. Le vent provient de la gauche. On voit que les vitesses de l'air sont faibles sur l'ensemble du domaine analysé.



Les résultats quantitatifs du rapport U/U_0 ont été regroupés dans un tableau ci-dessous afin de comparer les résultats obtenus par le modèle ke-realizable 2d et par le modèle RSM 2d. Les points étudiés sont situés, au centre des rues ou à 2.5m des façades et à 1m par rapport au coin des bâtiments, tous les points étant à une hauteur de 2m par rapport au sol. L'ensemble des points évalués quantitativement dans nos simulations et dans le test en tunnel à vent sont dessinés sur le schéma ci-dessous.



Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/U_0 à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations réalisées avec le logiciel FLUENT à l'aide de différents modèles de turbulence et de paramètres associés, à savoir le modèle k-epsilon réalisable convergé au second ordre, le modèle RSM standard convergé au second ordre, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « Wall B.C. from k Equation » activé, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « wall reflection effects ». Le modèle RSM avec le paramètre « Quadratic pressure-strain model » n'a pas pu converger dans ce cas-ci.

Outil de simulation utilisé	Moyenne du rapport U/U_0 calculée sur l'ensemble du tissu urbain à 2m (37 points : A1 à A7 + B1 à B8 + C1 à C7 + D1 à D8 + E1 à E7)	Moyenne du rapport U/U_0 calculée dans les rues exposées au vent à 2m (23 points : A1 à A7 + B4 + C1 à C7 + D4 + E1 à E7)	Moyenne du rapport U/U_0 calculée dans les rues abritées du vent à 2m (14 points : B1 à B3 + B5 à B8 + D1 à D3 + D5 à D8).
Test en soufflerie	0.52	0.63	0.33
k-ε réalisable (2d ordre)	0.39	0.46	0.27
RSM standard (2d ordre)	0.46	0.58	0.28
RSM-Wr (2d ordre)	0.55	0.7	0.27
RSM-wke (2d ordre)	0.4	0.45	0.3
RSM-qp (2d ordre)	/	/	/

Les conclusions sont les suivantes :

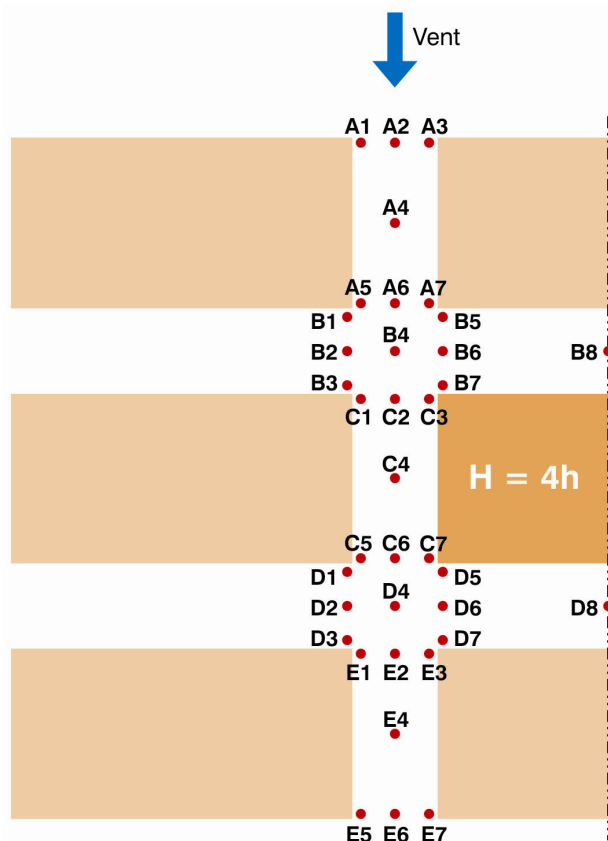
- d'un point de vue qualitatif, l'ensemble des modèles simulent bien le grand effet de protection au vent que constitue une telle morphologie bâtie.
- d'un point de vue quantitatif :
 - pour les rues exposées au vent, le modèle RSM standard prédit nettement mieux le rapport U/U_0 moyen que le modèle k-ε réalisable. En effet, l'erreur relative par rapport aux résultats du test en tunnel à vent est de 27% pour le modèle k-ε réalisable alors qu'elle n'est plus que de 8% pour le modèle RSM standard. Le paramètre « Wall B.C. from k Equation » est vraiment mauvais pour l'évaluation des rues exposées au vent puisqu'il donne une erreur environ égale à celle du modèle k-ε réalisable. En revanche, le modèle RSM avec le paramètre « wall reflection effects » donne de bons résultats avec une erreur relative par rapport au test en tunnel à vent de 11%.
 - pour les sections de rues abritées du vent, l'ensemble des modèles donnent des résultats plus proches, avec une erreur d'estimation sur le rapport U/U_0 moyen de 18% pour le modèle k-ε réalisable et le modèle RSM-wr, de 15% pour le modèle RSM standard et de 9% pour le modèle RSM-wke.

Pour l'ensemble du tissu urbain, il devient évident que le modèle RSM standard ou le modèle RSM-wr sont à privilégier par rapport au modèle k-ε réalisable ou au modèle RSM-wke. En effet, l'erreur relative par rapport au test en tunnel à vent est de 25% pour le modèle k-ε réalisable et 23% pour le modèle RSM-wke alors qu'elle n'est plus que de 11.5 % pour le modèle RSM standard et de 6% pour le modèle RSM-wr. La comparaison des différents paramètres utilisés pour le modèle RSM montre que la moyenne totale est légèrement meilleure avec le paramètre « wall reflection effects ». Le modèle RSM-standard reste toutefois un choix de qualité.

C'est donc le modèle RSM (standard ou avec le paramètre « wall reflection effects ») convergé au second ordre que nous gardons comme modèle idéal pour la simulation du vent en milieu urbain dense de hauteur homogène et relativement faible. Il faut toutefois préciser que des erreurs de l'ordre de 40% peuvent toutefois se produire très localement (sur quelques points du domaine simulé).

Cette étude nous permet de conclure que les simulations CFD réalisées à l'aide du logiciel FLUENT en utilisant le modèle RSM standard au second ordre évaluent les rapports U/U_0 moyens au niveau de l'ensemble d'un tissu urbain dense de hauteur homogène ainsi que dans les sections abritées du vent et les rues directement exposées au vent avec une précision supérieure ou égale à 15%. Il est toutefois important de considérer ce type de simulations comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain.

Le même exercice a été réalisé pour le même groupe de bâtiments mais avec un bâtiment central d'une hauteur égale à 4 fois la hauteur des autres bâtiments : $H = 4h$ avec $h=19m$ et $H=76m$.



Un premier maillage a été réalisé pour ce cas d'un milieu dense avec un bâtiment élevé. Le domaine a été agrandi longitudinalement pour correspondre aux critères suivants :

- espace libre avant le groupe de bâtiment d'une longueur égale à 10H où H est la hauteur du bâtiment élevé (H=76 m).
- espace libre après l'ensemble de bâtiments d'une longueur égale à 16H.

Les limites latérales, la hauteur du domaine et la précision du maillage sur la zone d'analyse sont restés identiques. Ainsi, le maillage comprend des cellules d'une hauteur de 0.5 m jusqu'à 40m de haut puis elles s'accroissent rapidement avec la hauteur. Dans le plan horizontal, les mailles sont de 2mx2m dans la zone d'analyse des vitesses de vent. Le maillage comprend environ deux millions de cellules.

Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/U_0 à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations réalisées avec le logiciel FLUENT à l'aide de différents modèles de turbulence et de paramètres associés, à savoir le modèle k-epsilon realizable convergé au second ordre, le modèle RSM standard convergé au second ordre, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « wall reflection effects ». Vu que l'effet du bâtiment élevé perturbe l'écoulement du vent dans les rues, nous avons choisi de comparer nos résultats avec ceux du test en tunnel à vent à partir des cinq groupes de points suivants : A1 à A7, B1 à B8, C1 à C7, D1 à D8, E1 à E8.

Outil de simulation utilisé	U/U_0 à 2m dans la zone A1 à A7	U/U_0 à 2m dans la zone B1 à B8	U/U_0 à 2m dans la zone C1 à C7	U/U_0 à 2m dans la zone D1 à D8	U/U_0 à 2m dans la zone E1 à E8	U/U_0 sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
k-ε realizable (2d ordre)	0.57	1.52	1.43	0.57	1.22	1.06
RSM standard (2d ordre)	0.34	1.32	1.3	0.57	1.17	0.94
RSM-Wr (2d ordre)	0.41	0.99	1.07	0.49	0.78	0.75

Il faut noter que la répartition des vitesses de l'air dans ce tissu urbain montre que globalement il s'agit d'une zone protégée du vent ($U/U_0 = 0.8$) mais que les vitesses de l'air deviennent inconfortables pour les piétons dans les zones B et C.

Notons aussi que la survitesse maximale mesurée sur ces 37 points vaut 1.7 pour le test en tunnel à vent, 1.8 pour le modèle k-ε realizable, 1.77 pour le modèle RSM standard et 1.76 pour le modèle RSM-Wr. L'évaluation de la survitesse maximale est donc bien modélisée.

En revanche, les simulations réalisées à l'aide de Fluent ne semblent pas assez précises pour évaluer la répartition des vitesses de l'air dans un milieu urbain dense de faible hauteur comprenant un bâtiment élevé. Le modèle RSM standard s'avère encore une fois nettement supérieur au modèle k-ε realizable mais ses performances ne sont pas suffisantes pour une évaluation précise du confort aux points situés dans le domaine B (surévaluation de 11% des survitesses) et surtout totalement fausses pour le domaine E. La différence moyenne entre le modèle

RSM standard et le test en tunnel à vent pour l'ensemble du tissu urbain est de 17.5%, ce qui est relativement élevé. Le modèle RSM-Wr améliore nettement l'évaluation des zones à faible vitesse et présente une erreur sur l'ensemble du domaine qui est inférieure à 10% mais par contre il donne encore une erreur approchant les 17% pour les zones B et C qui n'apparaissent plus réellement comme des zones à risque pour le confort des piétons.

Nous avons essayé un second maillage plus raffiné en hauteur pour cette configuration construite. En effet, les cellules présentaient une hauteur de 0.5m uniquement jusqu'à 40m de haut alors que le bâtiment mesure 76m de haut. Nous avons donc réalisé un maillage pour lequel les cellules présentent une hauteur de 0.5m de haut jusqu'à 120m, tout en conservant des mailles horizontales de 2mx2m dans la zone d'étude.

Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/U_o à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations FLUENT réalisées avec ce second maillage, à partir des cinq groupes de points suivants : A1 à A7, B1 à B8, C1 à C7, D1 à D8, E1 à E8.

Outil de simulation utilisé	U/U _o à 2m dans la zone A1 à A7	U/U _o à 2m dans la zone B1 à B8	U/U _o à 2m dans la zone C1 à C7	U/U _o à 2m dans la zone D1 à D8	U/U _o à 2m dans la zone E1 à E8	U/U _o sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
k-ε réalisable (2d ordre)	0.43	1.54	1.46	0.66	1.17	1.05
RSM standard (2d ordre)	0.3	1.33	1.37	0.63	1.08	0.85
RSM-Wr (2d ordre)	0.32	1.25	1.28	0.51	0.81	0.84

Notons aussi que la survitesse maximale mesurée sur ces 37 points vaut 1.7 pour le test en tunnel à vent, 1.77 pour le modèle k-ε réalisable, 1.78 pour le modèle RSM standard et 1.95 pour le modèle RSM-wr. L'évaluation de la survitesse maximale est donc bien modélisée. La pointe maximale est simulée plus précisément avec le modèle RSM standard (erreur de 5%) qu'avec le modèle RSM-wr (erreur de 15%).

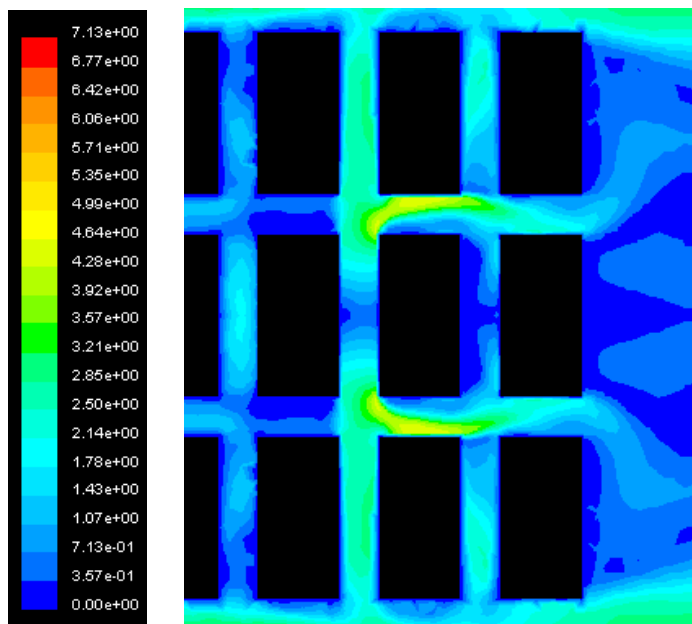
Cette amélioration du maillage sur la hauteur du grand bâtiment crée une amélioration très légère et largement insuffisante pour les résultats donnés par le modèle k-ε réalisable. Pour le modèle RSM standard, les valeurs moyennes sur l'ensemble du tissu urbain sont nettement meilleures que pour le maillage précédent : l'erreur relative par rapport aux tests en tunnel à vent est passée de 17.5% à 6%. Le modèle RSM-Wr donne toujours d'aussi bons résultats pour la vitesse moyenne sur l'ensemble du tissu urbain simulé et donne grâce à ce maillage raffiné une excellente évaluation des survitesses dans les zones B et C. Les survitesses maximales sont bien localisées pour les deux versions du modèle RSM. Toutefois, le modèle RSM standard présente toujours des survitesses inexplicables dans la zone E.

Le modèle RSM-wr s'avère spécialement adapté à ce type d'écoulement d'air en milieu urbain. Ce modèle RSM-wr utilisé avec ce maillage raffiné sur la hauteur du grand bâtiment donne de bons résultats pour les vitesses moyennes de l'air dans chaque zone et sur l'ensemble du tissu urbain. L'erreur relative entre les valeurs du test en tunnel à vent et les résultats de cette simulation reste inférieure à 20% pour l'ensemble des zones étudiées, y compris la zone E, dont la modélisation est plus délicate vu sa position dans le sillage du bâtiment élevé. Pour les vitesses élevées (zones B et C) ainsi que pour la moyenne générale des vitesses du vent sur la totalité du tissu urbain, cette erreur est limitée à 5%. La pointe de survitesse simulée par ce modèle au sein des 37 points spécifiés est toutefois supérieure de 15% à celle du test en tunnel à vent.

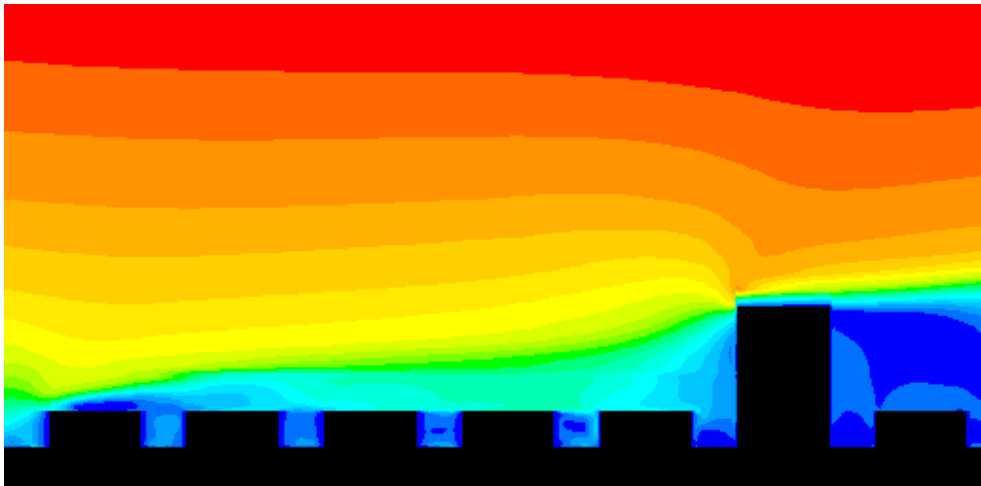
Notre conclusion est donc que ce type de morphologie bâtie peut être analysée avec succès à l'aide du logiciel FLUENT à condition d'utiliser les meilleurs paramètres de calcul et d'assurer une excellente répartition du maillage sur toute la hauteur du bâtiment élevé. A partir de cette simulation, nous pouvons recommander le modèle RSM avec le paramètre « wall reflection effects » convergé au second ordre pour les situations urbaines avec des hauteurs bâties variées. Nous avons prouvé que l'utilisation d'un maillage de 0.5m de haut sur une hauteur égale à 1.5 fois la hauteur du bâtiment élevé permet de donner de bons résultats au niveau piéton.

Il est toutefois important de considérer ce type de simulations comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain. Les zones de survitesses importantes sont bien localisées mais la pointe des survitesses peut être décentrée localement.

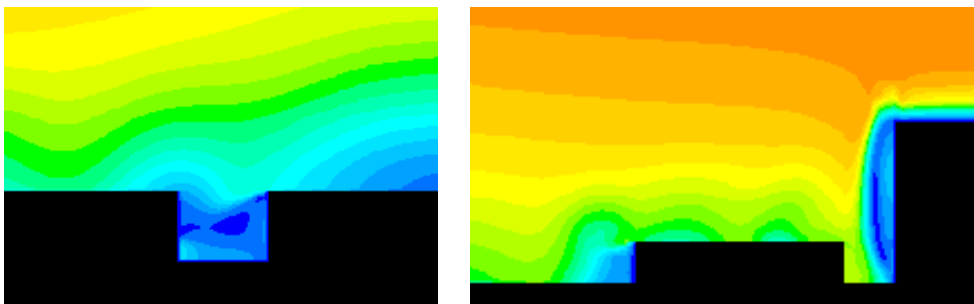
Les graphes ci-dessous montrent les résultats qualitatifs de nos simulations FLUENT pour ce cas complexe d'un milieu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé. L'échelle des vitesses est la même en plan et en coupes.



Distribution des vitesses de l'air en plan à 2m du sol



Coupe longitudinale passant par B8 et D8.



Coupes transversales passant par le point A4 (à gauche) et par le point C4 (à droite).

Un dernier test a été réalisé avec un maillage identique en hauteur mais raffiné horizontalement selon un quadrillage de 1.5mx1.5m dans la zone étudiée. Les résultats de cette simulation réalisée avec le modèle RSM-wr est donnée ci-dessous.

Outil de simulation utilisé	U/Uo à 2m dans la zone A1 à A7	U/Uo à 2m dans la zone B1 à B8	U/Uo à 2m dans la zone C1 à C7	U/Uo à 2m dans la zone D1 à D8	U/Uo à 2m dans la zone E1 à E8	U/Uo sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
RSM standard (2d ordre)	0.34	1.17	1.33	0.6	1.02	0.89
RSM-Wr (2d ordre)	0.37	1.27	1.31	0.55	0.7	0.84

Pour ce maillage raffiné horizontalement par des mailles de 1.5x1.5m², l'ensemble des valeurs du modèle RSM-Wr reste dans un intervalle de 10% par rapport au test en tunnel à vent, pour l'ensemble des cinq zones considérées ainsi que l'ensemble du tissu urbain. La pointe de survitesse simulée par ce modèle au sein des 37 points spécifiés reste cependant supérieure de 15% par rapport à celle du test en tunnel à vent.

Le modèle RSM standard convergé sur ce maillage raffiné donne d'excellents résultats pour les zones B et C comprenant les survitesses importantes mais il

surestime toujours fortement les vitesses dans la zone E. C'est donc le modèle RSM-Wr que nous choisissons définitivement pour les simulations réalisées en milieu urbain dense.

Il faut encore noter que la survitesse maximale vaut 1.7 pour les 37 points mesurés par test en tunnel à vent, ce qui correspond à une survitesse maximale de 1.95 pour ces 37 points au sein de notre simulation FLUENT avec le modèle RSM-wr et un maillage raffiné, mais qu'elle s'élève à 2.15 si on tient compte la totalité du domaine simulé à une hauteur de 2m au-dessus du sol. Ainsi, la valeur des survitesses maximales dans notre domaine de simulation dépasse de 10 % la valeur comprise dans les 37 points choisis pour l'étude du test en tunnel à vent. Cette remarque permet de souligner une grande faiblesse des essais en tunnel à vent par rapport aux simulations numériques : il est nécessaire d'y prédéfinir les endroits critiques avant d'en connaître la position avec certitude. Ainsi, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques dans un milieu urbain dense que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

4.3 Règles d'élaboration d'une simulation CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments

Le plus grand problème actuel concernant l'utilisation des simulations CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments est le manque d'informations précises sur les paramètres physiques et numériques du modèle à simuler. C'est pourquoi, nous avons pris le temps de réaliser une étude de validation sérieuse de l'outil FLUENT et une étude des différents paramètres des simulations qu'il offre afin de pouvoir en tirer des règles précises pour la création de simulations ultérieures pour l'étude du confort au vent en milieu bâti.

Nous pouvons déclarer que le logiciel FLUENT est validé pour l'évaluation des vitesses moyennes du vent autour des constructions à condition de répondre aux règles de construction des simulations développées ci-dessous. Ces règles ne correspondent pas à une optimisation de chacun des paramètres décrits mais elles sont suffisantes pour assurer la qualité d'une simulation CFD du point de vue quantitatif et qualitatif.

Les taille du domaine de simulations que nous recommandons doit correspondre aux règles suivantes:

- pour le choix de la hauteur et de la largeur du domaine à simuler, le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3%. Le rapport de blocage est le rapport entre la surface au vent des obstacles modélisés et la surface formée par le produit de la hauteur et de la largeur du domaine simulé, qui correspond généralement au plan d'introduction de l'air dans la simulation.
- la forme de la section du domaine à simuler (hauteur x largeur) doit de préférence s'approcher de la coupe de la configuration bâtie modélisée.
- la longueur du domaine s'étend en amont des bâtiments sur une distance de 10H et en aval sur une distance de 16H, où H est la hauteur du bâtiment le plus élevé.

Le domaine modélisé doit comprendre tout obstacle de taille supérieure à 1m dans un rayon de 10H. Le niveau de détail à simuler sur les bâtiments dépend de leur distance par rapport à l'espace public pour lequel la simulation est réalisée. Le bâtiment principal ou les bâtiments qui entourent une place sont ceux qui doivent être modélisés le plus précisément : pour ces bâtiments, tout élément de plus d'1m de large devrait idéalement être représenté dans la simulation. Les bâtiments plus éloignés peuvent par contre être représentés par de simples blocs.

Quand il est possible d'utiliser une condition de symétrie, il faut en profiter pour diminuer le domaine simulé de moitié.

Un maillage de qualité nécessite une grande précision. Le maillage sera non-structuré afin de pouvoir avoir des zones où les mailles sont très raffinées et d'autres zones où elles sont beaucoup moins denses. Le maillage doit être fortement raffiné au niveau piéton et dans les zones où de forts gradients de vent sont prévus. La taille des maillages utilisés pour notre validation de Fluent sur les trois contextes bâtis analysés (un bâtiment isolé, un groupe de bâtiments isolés et un milieu urbain dense) tourne entre un million et deux millions de cellules. Ces maillages sont généralement très peu uniformes avec des mailles de l'ordre 0.5m près des bâtiments et de 10 à 20 m loin des obstacles.

Nous recommandons une dimension minimale des mailles le long des façades au vent et des zones critiques, telles que les passages sous des bâtiments ou entre deux bâtiments très proches l'un de l'autre, de 0.5m de large. Pour la modélisation d'un milieu urbain dense de hauteur relativement faible, une hauteur de maille de 0.5m devrait être appliquée sur l'ensemble du milieu urbain, jusqu'à une hauteur équivalent à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments. Pour un milieu urbain dense de hauteur relativement faible comprenant un ou plusieurs bâtiments élevés, cette recommandation devrait être suivie sur l'ensemble du milieu urbain, jusqu'à une hauteur équivalent à 1.5 fois la hauteur du bâtiment le plus élevé. Pour un milieu urbain, le maillage devrait au minimum comprendre des mailles de 2m x 2m de large mais un maillage plus fin est toujours préférable.

Un maillage hexahédrique limite légèrement la diffusion des erreurs numériques par rapport à un maillage tétraédrique et, en général, il facilite la convergence du calcul au second ordre. Cependant, les maillages tétraédriques restent très utiles pour des géométries complexes où la taille du maillage devient une limitation car ils permettent une grande précision du maillage dans certaines zones avec un ensemble de cellules limité par rapport au même cas réalisé avec un maillage hexahédrique.

Le profil de vent utilisé est un élément majeur pour obtenir des résultats de qualité. Un profil de vent de campagne, de vent suburbain ou de vent urbain doit être choisi en fonction du type de tissu environnant le bâtiment étudié. Il est toutefois possible de tirer des conclusions approximatives des résultats escomptés pour n'importe quel type de vent à partir du moment où on possède le résultat pour l'un de ces trois types de vent standards.

Faire varier la vitesse du vent au niveau piéton tout en gardant le même profil de vent a peu d'influences sur la distribution de l'écoulement. Il suffit donc, pour chaque orientation du vent, de faire une simulation à l'aide d'un profil type de vent correspondant à la rugosité générale de la zone.

Nous recommandons les conditions aux limites suivantes pour les parois extérieures du domaine :

- des symétries sur les bords et la surface supérieure du domaine, ce qui force le flux d'air à être parallèle à ces surfaces. Cela implique donc que les dimensions du domaine précitées sont importantes.
- une limite « outflow » pour la surface de sortie de l'air ou parfois une condition de pression nulle pour cette surface. Le bord « outflow » impose une sortie de l'air qui correspond à un flux totalement développé ; il est donc important que la distance entre le bâtiment et la sortie corresponde aux valeurs citées ci-dessus.
- un profil de vitesse du vent variable avec la hauteur pour la surface d'entrée.
- Les bâtiments et le sol présentent une hauteur de rugosité nulle. Il s'agit donc de surfaces lisses, ce qui est nécessaire pour pouvoir suffisamment densifier le maillage au niveau des piétons.

Pour le traitement des zones proches des surfaces de type « mur » (sol, bâtiments,...), nous pouvons dès lors utiliser avec succès le modèle « wall function » pour lequel la couche visqueuse n'est pas résolue mais simulée.

D'un point de vue qualitatif, l'ensemble des modèles de turbulence proposés par FLUENT simulent bien la présence de zones de survitesses autour d'un bâtiment isolé ou d'un groupe de bâtiment ainsi que l'effet de protection au vent que constitue un milieu urbain dense de hauteur homogène et peu élevée.

Tous les modèles de turbulence donnent des résultats nettement supérieurs lorsqu'on les fait converger au 2d ordre plutôt qu'au 1^{er} ordre. Il faut mentionner que les problèmes de convergence proviennent en général d'un maillage trop inhomogène.

D'un point de vue quantitatif, le modèle de turbulence RSM devrait toujours être utilisé dans les études du confort des piétons pour les zones critiques du vent car il donne de très bons résultats pour l'évaluation des distributions moyennes du vent dans les trois contextes étudiés (bâtiments isolés, groupes de bâtiments, milieu urbain dense) quelques soient les hauteurs de bâtiments testées. Ce modèle permet non seulement d'identifier les zones critiques mais aussi de quantifier les amplitudes d'inconfort probables.

Pour les simulations de bâtiments isolés ou de groupes de bâtiments, le modèle RSM standard donne d'excellents résultats. En revanche, pour toutes les simulations d'un milieu urbain dense, il est préférable d'utiliser le modèle RSM de FLUENT avec le seul paramètre « wall reflection effects » activé. Ce modèle RSM utilisé avec le paramètre « wall reflection effects » permet de modéliser de manière très réaliste les profils de vent à l'intérieur du milieu urbain, que les rues soient exposées au vent ou qu'elles soient protégées du vent. De plus ce paramètre améliore fortement la qualité de la distribution des vitesses moyennes au niveau piéton lorsque le milieu urbain comprend des bâtiments aux hauteurs inhomogènes. Il faut vérifier la qualité de la convergence d'une simulation par le monitoring d'une ou plusieurs valeurs clefs dans la région d'intérêt la plus importante pour cette simulation, par exemple la pression sur une façade du bâtiment principal, en plus de l'évolution générale des paramètres de vitesse et de turbulence donnés par le logiciel.

Pour les bâtiments isolés et les groupes de bâtiments, nous avons montré que l'utilisation des règles de conception d'une simulation présentées ci-dessus et l'utilisation du modèle de turbulence RSM de FLUENT convergé au second ordre donnent des valeurs de vitesses moyennes au niveau piéton avec une précision quantitative de 15% pour l'ensemble des survitesses locales du vent et de quelques pourcents (<5%) pour la pointe de survitesse maximale. Les zones critiques par rapport au vent sont localisées très précisément à l'aide de ce type de simulations.

Vu la complexité de l'écoulement du vent en milieu urbain dense, les méthodes CFD ne donnent pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point dans un tel contexte construit. Il faut signaler que des erreurs de l'ordre de 40% ou même plus peuvent se produire très localement. En revanche, en suivant les règles ci-dessus pour la construction d'une simulation dans un milieu urbain dense, nous obtiendrons :

- pour les rues exposées au vent dans un tissu de hauteur homogène, une erreur relative inférieure à 15% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble de la rue dans un tunnel à vent.
- pour les sections de rues abritées du vent dans un tissu de hauteur homogène, une erreur relative inférieure à 20% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble de ces sections de rues protégées. Cette erreur est légèrement plus élevée que les autres limites acquises jusqu'à présent mais il est important de se souvenir qu'elle concerne des vitesses de vent très faibles où le confort des personnes n'est pas mis en cause.
- une erreur relative inférieure à 15% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble du tissu urbain de hauteur homogène.
- une erreur relative inférieure à 20% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées pour les différentes zones d'écoulement à l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé, y compris dans la zone de sillage du bâtiment élevé. Cette limite peut être abaissée à 10% en utilisant des mailles mesurant horizontalement 1.5m x 1.5m sur l'ensemble de la zone à quantifier.
- une erreur relative limitée à 5% par rapport à la moyenne des vitesses pour les zones présentant des survitesses du vent à l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé ainsi que pour la moyenne générale des vitesses du vent sur la totalité du tissu urbain.
- une précision de 15% pour la pointe maximale des survitesses générées au pied d'un bâtiment élevé situé au sein d'un milieu urbain dense de petite hauteur.
- une bonne localisation des zones de survitesses importantes en milieu urbain dense bien que les pointes de survitesses peuvent être décentrées localement.

Il est donc important de considérer les simulations CFD de milieux urbains denses comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain. Des résultats encore plus précis peuvent toutefois être obtenus si les maillages sont fortement densifiés, ce qui n'était pas possible dans cette thèse en fonction des moyens de calcul dont nous disposions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux résultats obtenus sur l'ensemble du domaine simulé, qui peuvent être présentés en couleur et de manière détaillée en plans, en coupes et en trois dimensions. Cette remarque permet de souligner une grande faiblesse des essais en tunnel à vent par rapport aux simulations numériques : il est nécessaire d'y prédéfinir les endroits critiques avant d'en connaître la position avec certitude. Ainsi, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

Pour les essais en tunnel à vent comme pour les simulations CFD, les résultats obtenus correspondent aux vitesses de vent générées par un profil de vent type sur un modèle réduit (physique ou numérique) et ils sont généralement analysés à l'aide des statistiques du vent à la station météorologique la plus proche. Il faut toutefois ajouter que ces résultats comprennent une incertitude liée à la modélisation du site et à la précision de l'outil de simulation choisi (type d'appareils de mesures pour un essai en tunnel à vent, choix du modèle de turbulence pour une simulation CFD,...) mais aussi au choix du vent de référence et à l'écart entre les statistiques du vent à la station météorologique et les données réelles sur le site à un moment donné.

Willemsen et Wisse affirment à partir d'une étude réalisée sur les tunnels à vent des Pays Bas qu'une erreur standard de l'évaluation du vent au niveau piéton pour des tests en tunnel à vent sur un environnement construit en tenant compte des valeurs météorologiques statistiques est de 20% par rapport aux valeurs du vent mesurées sur un site réel (Willemsen & Wisse 2002). Il ne sert donc à rien de se focaliser sur une précision de quelques pourcents pour essayer de prédire avec certitude la vitesse du vent en un endroit d'une place. Par contre, notre étude prouve que nos simulations FLUENT sont bien assez précises pour analyser les zones critiques du point de vue du confort au vent et comparer différents tissus urbains entre eux.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour des bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour d'un bâtiment isolé, autour d'un petit groupe de bâtiments, en milieu urbain dense de hauteur homogène et relativement faible ainsi qu'en milieu urbain dense de hauteur faible comprenant un bâtiment élevé.

4.4 Outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des bâtiments

L'impact des bâtiments sur la vitesse du vent au niveau piéton est un domaine très complexe que nous avons commencé à étudier à l'aide de simulations CFD et pour lequel des outils quantitatifs simplifiés ont été élaborés.

Les conclusions et graphiques présentés dans cette section proviennent en grande partie de l'analyse des simulations réalisées dans le cadre de cette thèse de doctorat, sur base des règles élaborées au point 4.3 et à l'aide du logiciel FLUENT, qui a été validé pour l'étude du confort au vent des piétons au point 4.2. Ces résultats sont complétés par des références bibliographiques chaque fois que cela s'est avéré utile.

Nos simulations de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés, autour de groupes de bâtiments isolés et au sein d'un milieu urbain dense constituent un réservoir d'informations quantitatives et qualitatives pour la compréhension de l'écoulement du vent autour des bâtiments. Cette étude longue et complexe a abouti à l'élaboration d'abaques pour l'évaluation des survitesses du vent autour de bâtiments. Ces outils graphiques permettent d'évaluer rapidement les risques d'inconfort dû au vent au niveau piéton dans les configurations bâties étudiées.

Ce chapitre consiste à présenter les résultats quantitatifs et qualitatifs de nos simulations CFD en fonction des différents effets critiques du vent autour des bâtiments. Les résultats que nous présentons sont basés sur une étude paramétrique des dimensions des bâtiments pour quantifier plus précisément différents effets critiques du vent au niveau piéton. **Il est important de souligner que nous avons fait le choix de baser nos simulations et nos outils quantitatifs sur une analyse du projet en fonction des mécanismes d'écoulement du vent plutôt qu'une analyse basée uniquement sur la forme des bâtiments. Ce choix permet en effet de diminuer le nombre de simulations à réaliser et en même temps de faciliter la compréhension des phénomènes aérodynamiques.**

Les outils quantitatifs simplifiés qui sont élaborés dans cette thèse de doctorat doivent être considérés comme une première approche d'un phénomène très complexe. Leurs résultats ne donnent des valeurs exactes que pour les conditions prises comme hypothèses dans nos simulations. Vu la complexité des profils de vent réels (rugosité des terrains environnants, relief,...) et les statistiques météorologiques variables, ces outils doivent donc être utilisés avec prudence. Ils sont en revanche très utiles pour prendre conscience des risques liés au vent susceptibles d'apparaître dans un plan masse ou pour comparer l'influence de plusieurs configurations ou de différentes options d'un projet les unes par rapport aux autres. Ils permettront de prédire de manière précise les zones les plus sensibles où les survitesses de vent risquent de se produire régulièrement.

Ainsi, les outils de quantification de l'inconfort au vent présentés ci-dessous sont des outils simplifiés dont le but est à la fois de permettre une évaluation des risques d'inconfort dû au vent dans un premier stade de conception et également de comparer différentes options urbanistiques ou architecturales du point de vue de leur effet sur l'écoulement du vent. L'étude précise de projets spécifiques dans un contexte complexe nécessite de passer par des simulations CFD du projet en question ou des tests en tunnel aérodynamique.

La méthode qui permet de combiner un calcul simplifié de l'influence de la topographie, de la rugosité des terrains environnants et de l'influence des bâtiments est expliquée dans le chapitre précédent pages 397 et 398. Cette partie permet de déterminer le rapport U/U_0 dépendant du contexte construit autour de configurations simples.

La vitesse U est la vitesse simulée sur le site défini à la hauteur de 1.5m (pour correspondre à la zone de confort des piétons) et la vitesse U_0 est la vitesse de référence de ce terrain, c'est-à-dire une vitesse prise également à la hauteur de 1.5m mais dans un contexte sans bâtiment avec le même profil de vent que la valeur U_0 . Les rapports U/U_0 correspondent donc au rapport entre la vitesse de vent sur le site et la vitesse qui serait atteinte si le site n'était pas construit localement (mais dont la rugosité générale serait la même). Ainsi, quand le rapport U/U_0 est supérieur à 1 cela signifie que le contexte construit accélère la vitesse du vent au niveau piéton alors que lorsque le rapport U/U_0 est inférieur à 1 cela signifie que le vent est freiné par les bâtiments et donc que le microclimat local présente des vitesses de vent inférieures à celles qu'on aurait sans ces constructions.

Toutes les simulations réalisées dans cette thèse se basent sur le profil de vent suivant :

$$U = K z^\alpha U_{10, \text{météo}}$$

Où U est la vitesse sur le site, K et α sont donnés dans le tableau ci-dessous, z est la hauteur à laquelle on désire obtenir le résultat et $U_{10, \text{météo}}$ est la vitesse météo à 10m du sol.

Terrain	K	α	Z_0	d
Mer	0.7	0.14	0.005	0
Station météo ; terrain totalement dégagé	0.68	0.17	0.03	0
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2	0.1	0.7h
Tissu suburbain	0.4	0.235	0.5	0.8h
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25	1	0.8h
Centre-ville très dense avec hauteurs de bâtiments très irréguliers	0.21	0.33	2.5	0.8h

Le profil de base utilisé dans nos simulations correspond aux paramètres du tissu urbain (bâti continu). Notre vitesse de vent de référence pour un tissu urbain est de 5m/s à une hauteur de 1.5m de haut ($U_0 = 5\text{m/s}$ à 1.5m de haut), ce qui correspond à une vitesse de 12.91 m/s à 10m de haut à la station météorologique.

En fonction des statistiques du vent à Uccle (Bruxelles), on peut conclure qu'un bâtiment ou un groupe de bâtiments ne créant qu'un effet critique du vent dans une seule direction particulière peut être considéré comme confortable en Belgique (sauf à la Côte où les vitesses de vent sont plus élevées) si le rapport U/U_0 généré dans cette orientation reste inférieur ou égal à 1.4. Cette valeur correspond à l'hypothèse que, dans les espaces publics de détente, la fréquence maximale de dépassement de la limite de confort vaut 5%. Evidemment si plusieurs effets critiques se cumulent pour un même ensemble bâti, la limite du rapport U/U_0 acceptable doit être diminuée en conséquence.

Des outils quantitatifs ont été élaborés à partir de nos simulations numériques réalisées à l'aide de FLUENT pour différentes paramètres du vent et un grand nombre de géométries de bâtiments. Pour chaque type d'effet du vent autour des bâtiments, des conseils pratiques de conception sont donnés par rapport au problème considéré.

Les outils d'évaluation des survitesses de vent autour des bâtiments que nous avons élaborés à l'aide de nos simulations FLUENT permettent de quantifier et de comprendre les effets suivants :

- tous les mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples :
 - l'effet de coin,
 - l'effet de cisaillement,
 - l'effet de passage sous immeuble,
 - le rouleau tourbillonnaire,
 - l'effet de barre.
- l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé.
- trois mécanismes critiques du vent autour de groupes de bâtiments :
 - l'effet Venturi,
 - l'effet Wise,
 - l'effet de double coin.
- trois types d'écoulement du vent dans un milieu urbain dense :
 - l'effet de masque urbain,
 - l'effet canyon
 - l'implantation d'un bâtiment élevé dans un milieu urbain de faible hauteur.

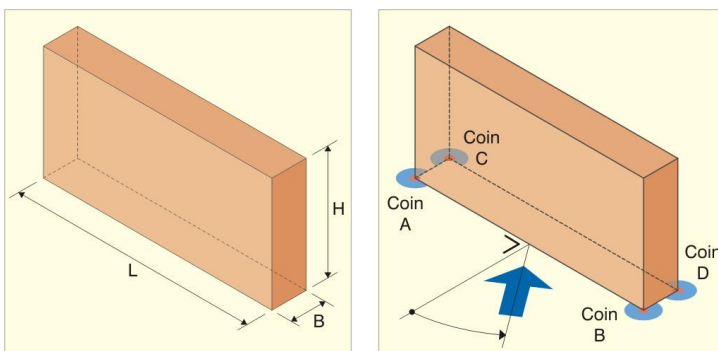
Les autres mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de groupes de bâtiments (effet de bâtiments en quinconce, effet de canalisation, effet de maille, effet d'écran linéaire et effet de pyramide), l'effet de la végétation et les autres mécanismes spécifiques de l'écoulement du vent en milieu urbain dense (ensembles de bâtiments élevés) sont expliqués et quantifiés à partir de résultats trouvés dans la littérature.

La méthodologie développée dans cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent autour des groupes de bâtiments ainsi que pour les phénomènes d'écoulement du vent au sein d'un tissu urbain dense.

Rappelons qu'un étage fait environ 3m de haut. Le bâtiment le plus haut de Belgique est la tour du midi (149m). Le palais de justice de Bruxelles atteint 103m grâce à sa coupole mais les bords s'élèvent à 36m.

4.4.1 L'effet de coin

La **première configuration** de l'effet de coin est simulée pour un bâtiment élevé isolé de hauteur H , de longueur L et de largeur B . Les coins de la façade au vent du bâtiment ont été baptisés « coin A » et « coin B », les deux coins de la façade sous le vent « coin C » et « coin D ».



Une comparaison de cet effet de coin au pied d'un bâtiment perpendiculaire au vent, de 48m de long, 48m de haut et 12m de large a été réalisée pour un profil de vent de campagne, un profil de vent suburbain et un profil de vent urbain. Les profils de vent utilisés suivent les formules suivantes.

Vent de campagne :

$0.52 Z^{0.2} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 7.28m/s à 1.5m du sol.

Vent suburbain :

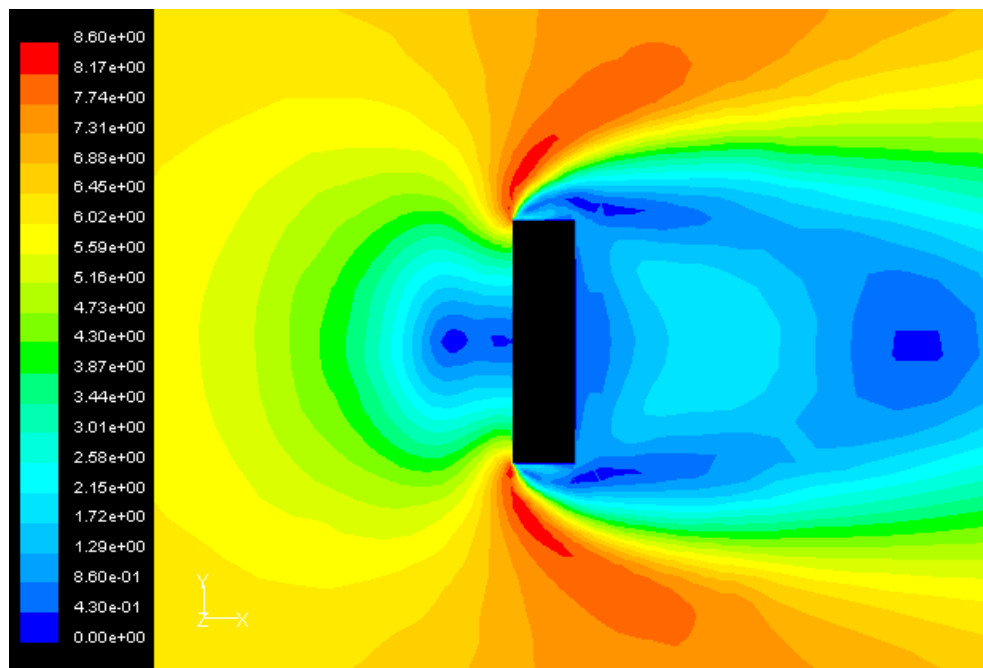
$0.4 Z^{0.235} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 5.68m/s à 1.5m du sol.

Vent urbain :

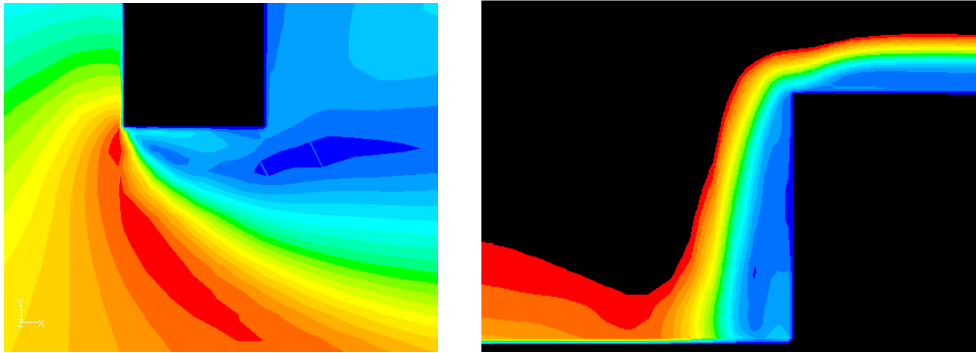
$0.35 Z^{0.25} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 5m/s à 1.5m du sol.

La vitesse de l'air maximale au coin du bâtiment simulé vaut 12.1 m/s pour un vent de campagne, 10.4m/s pour un vent suburbain et 9.7 m/s pour un vent urbain, ce qui donne un rapport $U/U_0 = 1.66$ pour un vent de campagne, $U/U_0 = 1.83$ pour un vent suburbain et $U/U_0 = 1.94$ pour un vent urbain. Il est important de signaler que l'ensemble des outils graphiques décrits ci-dessous ont été élaborés à partir d'un profil de vent urbain. En première approximation, on peut obtenir les résultats pour un profil de vent suburbain ou un profil de vent de campagne en multipliant les valeurs présentées ci-dessous par 0.945 pour un vent suburbain et par 0.855 pour un vent de campagne.

Le graphique ci-dessous montre l'effet de coin autour d'un bâtiment de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, pour un angle d'incidence du vent de 0°. Il s'agit de la distribution des vitesses moyennes du vent en plan à 1.5m de haut et en coupe 3m après la façade au vent du bâtiment. L'échelle sur le côté gauche, qui est valable pour les trois graphes présentés, donne la vitesse moyenne du vent en m/s au niveau piéton. On voit bien les survitesses engendrées au niveau des coins au vent du bâtiment et leur prolongement dans un sillage à vitesse élevée.



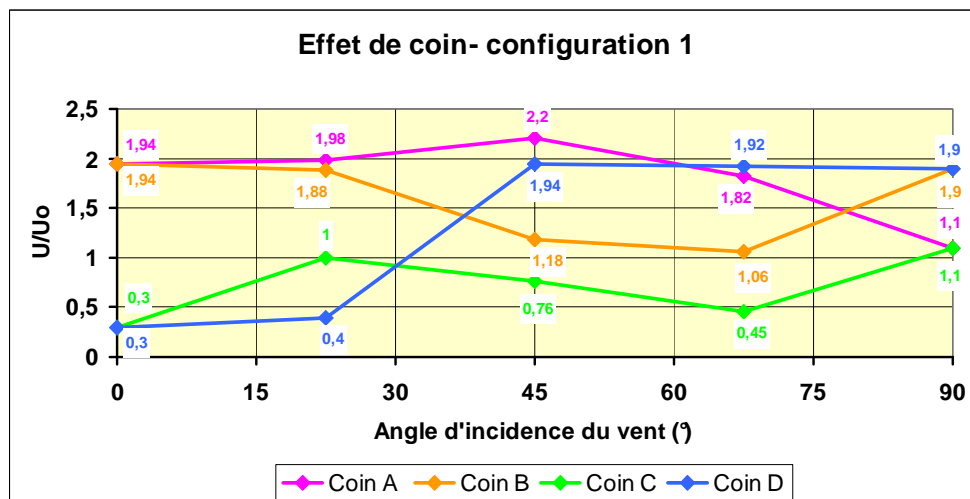
Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour un effet de coin (L=48m, H=24m, B= 12m)



Plan (à gauche) et coupe (à droite) des survitesses du vent au coin du bâtiment.

Les dessins ci-dessus montrent qu'en plus de la zone de survitesses, l'effet de coin conduit à un gradient horizontal de vitesses très important, ce qui est particulièrement inconfortable pour les piétons.

Le graphe ci-dessous donne une évaluation quantitative des survitesses générées au niveau piéton par un bâtiment de 48m de haut, de 48m de long et de 12m de large aux quatre coins du bâtiment lorsque l'angle d'incidence α varie de 0° à 90° dans le sens antihorlogique.

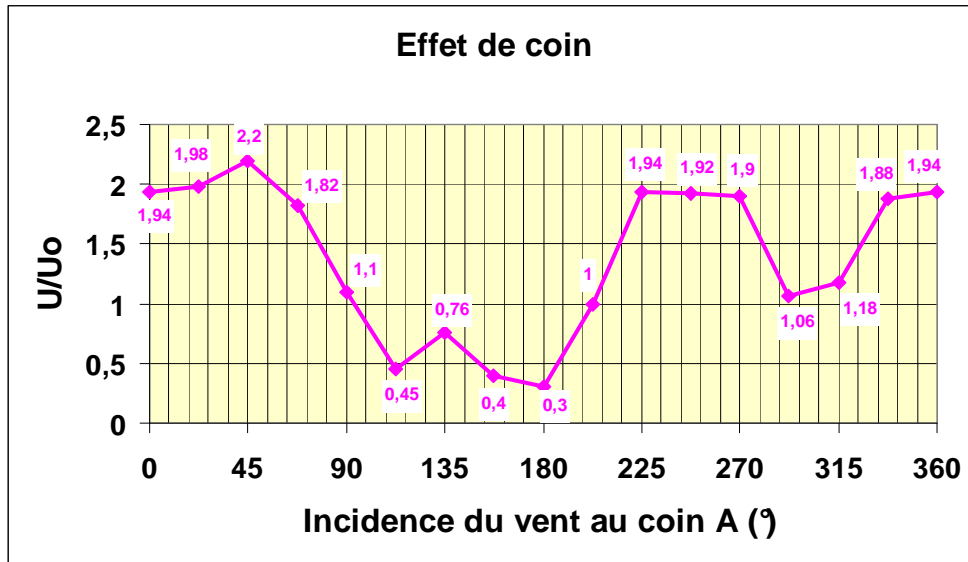


Pour un angle d'incidence du vent de 0° par rapport à la normale, les deux coins de la longue façade au vent sont les zones où l'inconfort au vent sera maximal. Lorsque l'incidence du vent est de 90° , ce sont à nouveau les coins de la façade au vent qui seront les plus critiques mais cette fois il s'agit de la petite façade latérale. Enfin, pour des angles intermédiaires, les zones les plus critiques dépendent de l'angle d'incidence du vent selon le schéma ci-dessus.

La moyenne des valeurs du rapport U/U_0 de l'effet de coin pour les deux coins les plus critiques à chaque orientation du vent vaut 1.94. L'incidence du vent à 0° n'est donc pas l'incidence la plus critique du point de vue de l'effet de coin mais c'est une incidence représentative de la moyenne des effets critiques du vent au niveau des coins du bâtiment pour un vent variable. Dès lors toutes les simulations qui vont être réalisées par la suite pour cet effet de coin sont calculées pour une incidence de 0° . Les rapports U/U_0 maximaux pour chaque orientation varient autour de cette valeur de référence (incidence du vent à 0°) dans une fourchette de -2% à +13%.

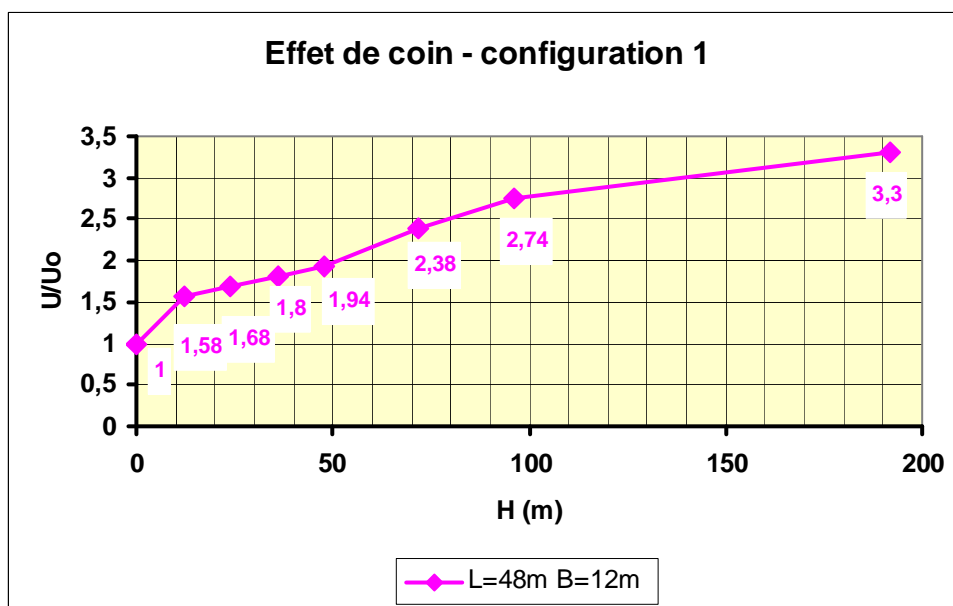
Rappelons toutefois que pour chaque angle d'incidence du vent, plusieurs effet différents peuvent apparaître, comme par exemple l'effet de coin et l'effet de barre. Il est donc indispensable de tenir compte de ces différents effets critiques en se référant pour chacun d'eux au paragraphe qui l'analyse.

Le graphe ci-dessous reprend le rapport U/U_0 autour du coin A du même bâtiment pour une orientation du vent variant de 0 à 360° dans le sens antihorlogique.



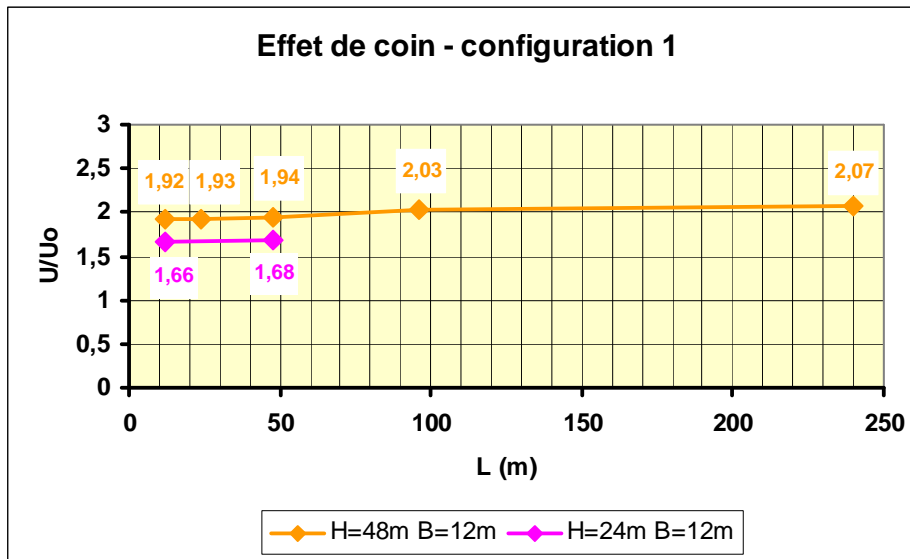
Ce schéma prouve que l'incidence du vent la plus critique du point de vue de l'effet de coin est une incidence de 45° par rapport à la normale à la façade au vent.

Pour évaluer l'effet de la hauteur du bâtiment élevé sur le confort au niveau piéton, des simulations ont été réalisées avec différentes hauteurs H pour un bâtiment de 48m de long et de 12m de large avec un vent perpendiculaire (incidence du vent = 0°). Le graphe suivant donne le rapport U/U_0 maximal simulé au coin de ce bâtiment pour des hauteurs H de 12m, 24m, 36m, 48m, 72m, 96m, et 192m.



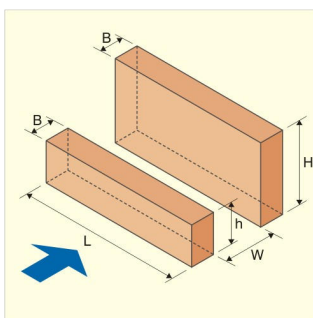
Ce graphe montre que les niveaux d'inconfort au vent au coin d'un bâtiment s'accroissent rapidement avec la hauteur de celui-ci. La hauteur est donc un élément fondamental pour la détermination de l'inconfort piéton au niveau des coins des grands bâtiments. En doublant la hauteur d'un édifice de 12m à 24m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.06 et en la quadruplant on le multiplie par 1.23. Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur d'un bâtiment élevé sur l'effet de coin pour deux hauteurs de bâtiment différentes :

- pour une hauteur du bâtiment élevé fixée à 48m, sa longueur vaut successivement 12m, 24m, 48m, 96m et 240m.
- pour une hauteur du bâtiment élevé fixée à 24 m, sa longueur vaut successivement 12m et 48m.



L'effet de coin est donc un effet critique du vent qui est pratiquement indépendant de la longueur du bâtiment. On note toutefois une très légère augmentation de l'inconfort pour des bâtiments de grande longueur. En doublant la longueur d'un édifice de 12m à 24m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.005 et en la quadruplant on le multiplie par 1.01. Cette faible influence de la longueur du bâtiment sur l'intensité de l'effet de coin signifie que la longueur du bâtiment peut être négligée dans l'évaluation de l'effet de coin en première phase du projet. En effet, doubler la hauteur d'un bâtiment augmente nettement plus l'inconfort au niveau piéton que quadrupler sa longueur...

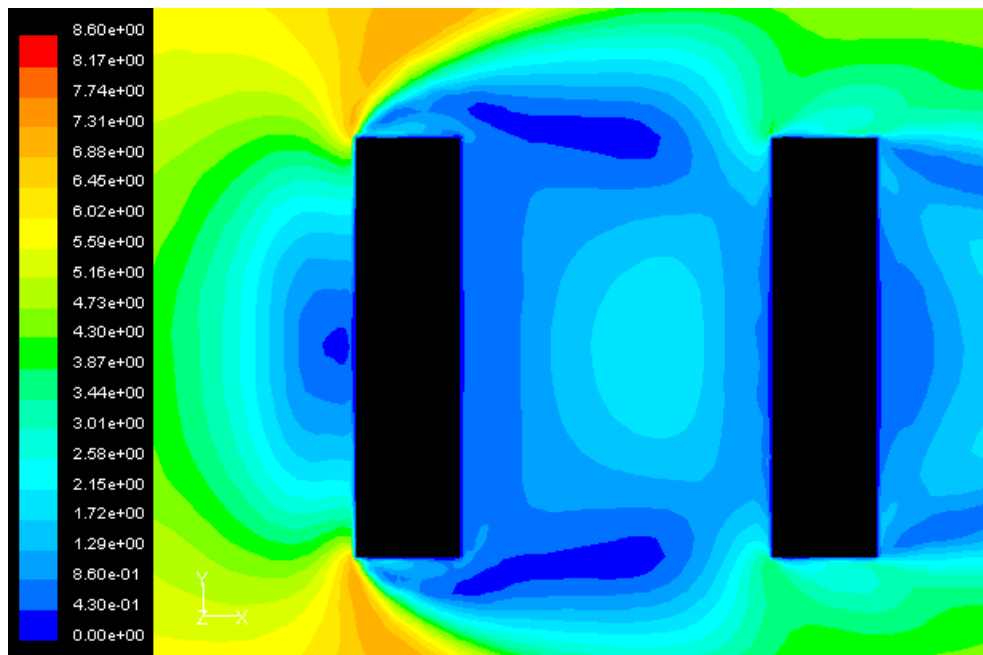
La **deuxième configuration** de l'effet de coin consiste en un bâtiment élevé (de hauteur H , de longueur L et de largeur B) précédé d'un petit bâtiment (de hauteur h , de même longueur L et largeur B). L'inter-distance entre les deux bâtiments est W .



Effet de coin – configuration 2

Notons que cette seconde configuration de l'effet de coin a déjà été en partie étudiée par Penwarden et Wise en tunnel à vent. Il n'est toutefois pas possible d'utiliser directement leurs résultats car le profil de vent utilisé par Penwarden et Wise est fort différent de celui que nous avons choisi pour nos outils graphiques quantitatifs. D'autre part, leurs mesures étaient réalisées à une hauteur de 3m de haut ce qui nous semble nettement trop élevé pour évaluer le confort réel des piétons. L'ensemble des résultats présentés ci-dessous correspond à des vitesses de vent évaluées à 1.5m du sol, c'est-à-dire arrivant au niveau du visage ou de la poitrine des passants. Un essai de recalage des données de Penwarden et Wise a été réalisé mais le facteur de transformation pour prendre en compte notre choix de profil de vent et une hauteur d'évaluation de 1.5m de haut n'était pas linéairement proportionnel à la hauteur des bâtiments.

Reprenons le premier exemple de l'effet de coin pour un bâtiment isolé : hauteur de 24m, longueur de 48m, largeur de 12m. Ce bâtiment est précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut et 48m de long à une distance de 36m. Le second bâtiment est le même que dans la configuration 1 et l'échelle des vitesses du graphique ci-dessous est également la même que celle des simulations de la configuration 1.



Courbes iso-vitesses à 1.5m du sol

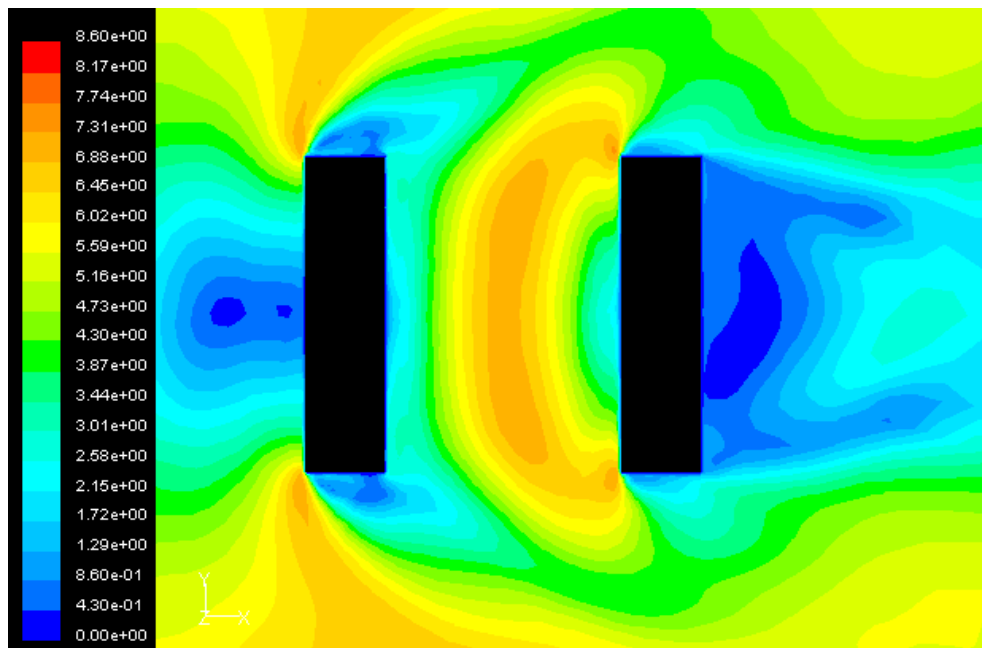
On voit bien que l'effet de coin autour du premier bâtiment se fait comme dans le cas d'un bâtiment isolé bien que l'intensité de la survitesse au coin de ce bâtiment soit légèrement plus faible que dans le cas d'un bâtiment seul de 12m de haut. L'intérêt de cette configuration réside surtout dans la forte réduction de l'effet de coin au pied du second bâtiment : l'intensité de l'effet de coin y est diminuée et son sillage est fortement ralenti. Ainsi, ajouter un petit bâtiment devant un plus grand permet de réduire l'impact de l'effet de coin.

Dans la configuration ci-dessus, le rapport des survitesses U/U_0 vaut 1.44 pour le coin du premier bâtiment alors qu'il valait 1.58 pour un bâtiment isolé de 12m de haut. Ce rapport U/U_0 est réduit à 0.77 pour le second bâtiment de 24m de haut dont le rapport de survitesses serait 1.68 s'il n'était pas précédé d'un plus petit

bâtiment. Le premier bâtiment a donc un effet réellement protecteur sur l'effet de coin du second bâtiment.

En revanche, il faut faire attention à l'écart entre ces deux bâtiments et leurs hauteurs respectives car un autre effet critique peut apparaître entre ceux-ci. En effet, sous certaines conditions, la présence d'une construction relativement basse devant un immeuble élevé augmente dans des proportions importantes l'effet de rouleau tourbillonnaire (décrit au point 4.4.4) générant un effet spécifique appelé l'effet Wise (analysé au point 4.4.7).

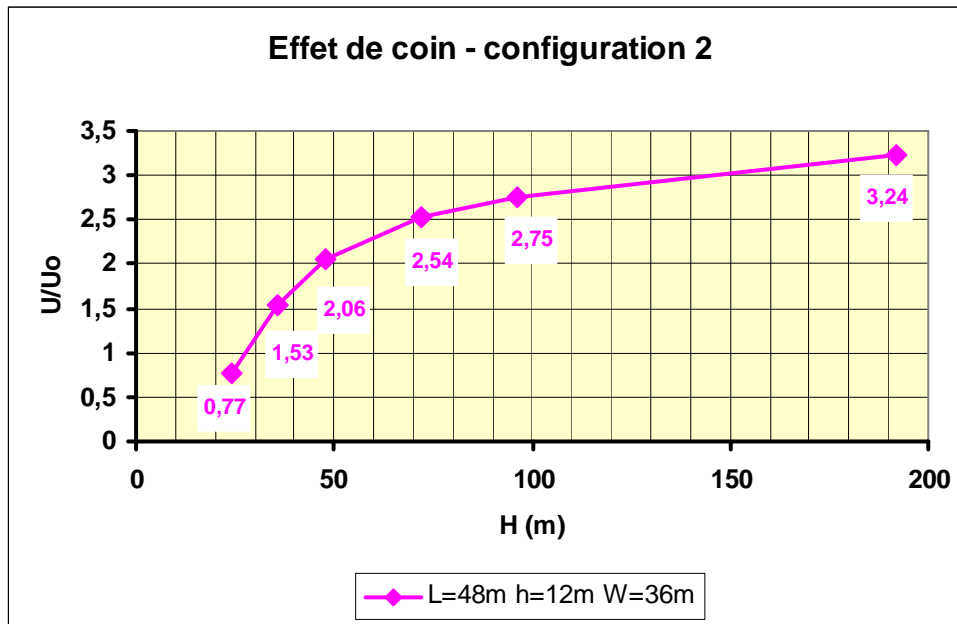
L'apparition de l'effet Wise dans une configuration bénéfique pour l'effet de coin est illustrée ci-dessous par un bâtiment de 24m de haut suivi à une distance de 36m d'un bâtiment élevé de 48m de haut. Dans ce cas-ci, le premier bâtiment est le même que dans la configuration 1 et le second bâtiment est encore plus élevé. L'échelle des vitesses du graphique ci-dessous est la même que celle des simulations de la configuration 1. L'effet Wise apparaît au centre des deux bâtiments. Il est toutefois visible que l'intensité des survitesses qu'il génère est nettement moins élevée que celle provoquée par l'effet de coin.



Courbes iso-vitesses à 1.5m du sol

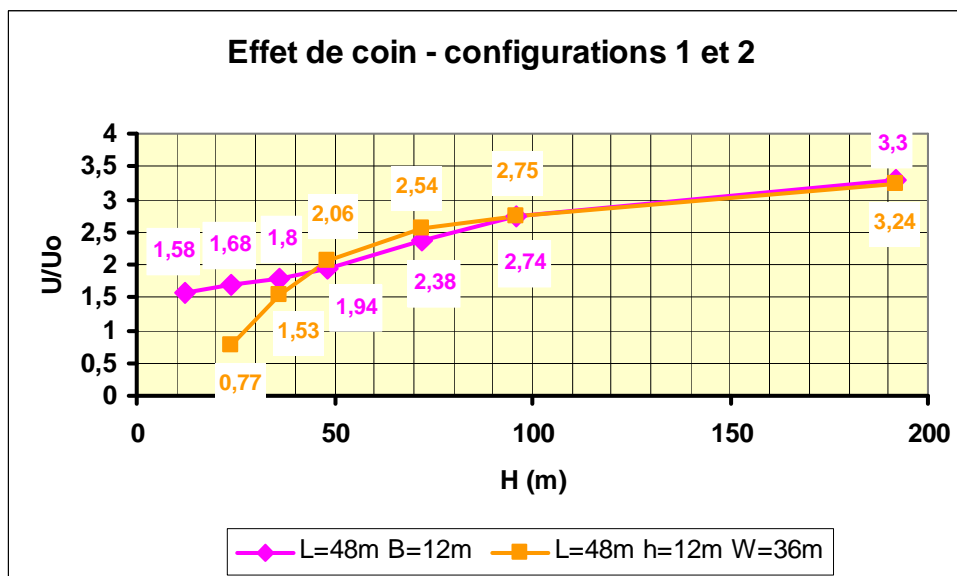
Malgré l'apparition de l'effet Wise, cette configuration reste bénéfique du point de vue de l'effet de coin. Ainsi, le rapport des survitesses U/U_0 généré par l'effet de coin vaut 1.46 au coin du premier bâtiment alors qu'il valait 1.68 pour un bâtiment isolé de 24m de haut. Ce rapport U/U_0 vaut également 1.46 pour le second bâtiment de 48m de haut dont le rapport de survitesses serait 1.94 s'il n'était pas précédé d'un plus petit bâtiment.

Pour un bâtiment élevé de 48m de long et 12m de large, précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut, 48m de long et 12m de large, avec une inter-distance entre ces deux bâtiments de 36m, les valeurs de l'effet de coin varient en fonction de la hauteur du grand bâtiment. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 maximal simulé au coin du grand bâtiment pour des hauteurs H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m et 192m.



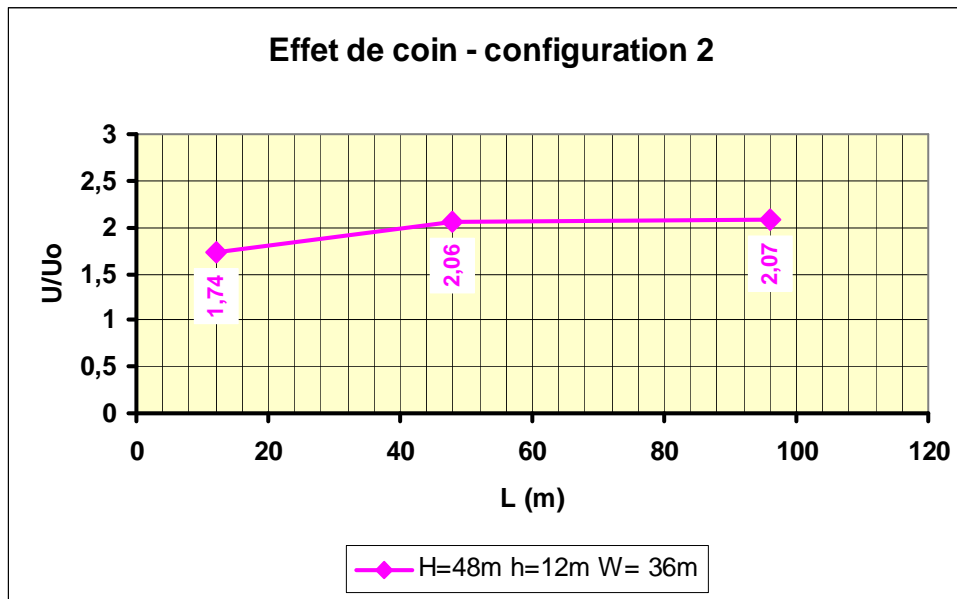
Au pied du bâtiment de 24m de haut, il y a une zone protégée du vent, favorisant le confort des piétons. Par contre, pour des hauteurs égales ou supérieures à 36m de haut, les niveaux d'inconfort au coin du grand bâtiment s'accroissent rapidement avec la hauteur de celui-ci. La hauteur reste donc un élément fondamental pour la détermination de l'inconfort des piétons au niveau des coins des grands bâtiments même dans le cas de cette seconde configuration utilisant la protection d'un bâtiment de faible hauteur.

Le schéma suivant compare la forme des courbes de croissance de la survitesse maximale liée à l'effet de coin, pour un bâtiment isolé (configuration 1) et un bâtiment élevé précédé d'un petit bâtiment de 12m (configuration 2), en fonction de leur hauteur.



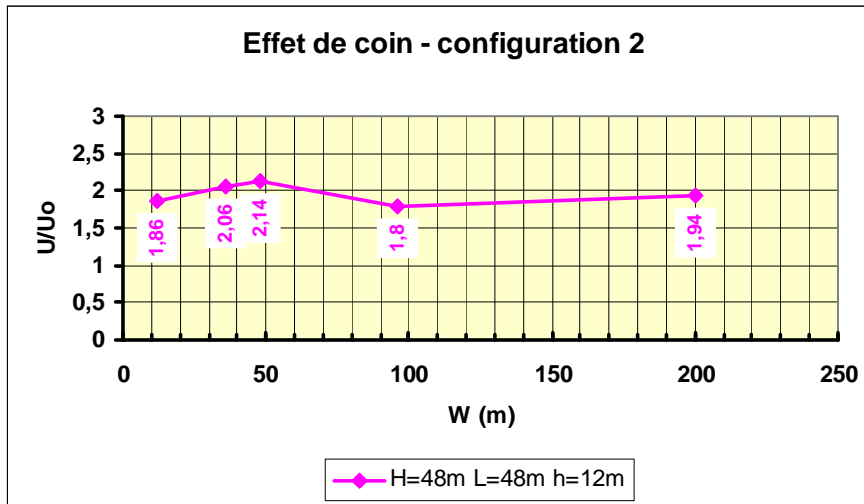
Au vu de ce graphe, il devient évident que rajouter un bâtiment de 12m de haut à une distance de 36m en amont d'un bâtiment élevé n'a un effet réellement protecteur par rapport à l'effet de coin que pour une hauteur du bâtiment élevé inférieure ou égale à 30m, c'est-à-dire pour un rapport $H/h \leq 2.5$.

Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur du groupe de bâtiments sur l'effet de coin au pied du bâtiment élevé. La hauteur du bâtiment élevé est cette fois fixée à 48m, celle du petit bâtiment à 12m, pour une longueur variable, de respectivement 12m, 48m et 96m, identique pour les deux bâtiments.



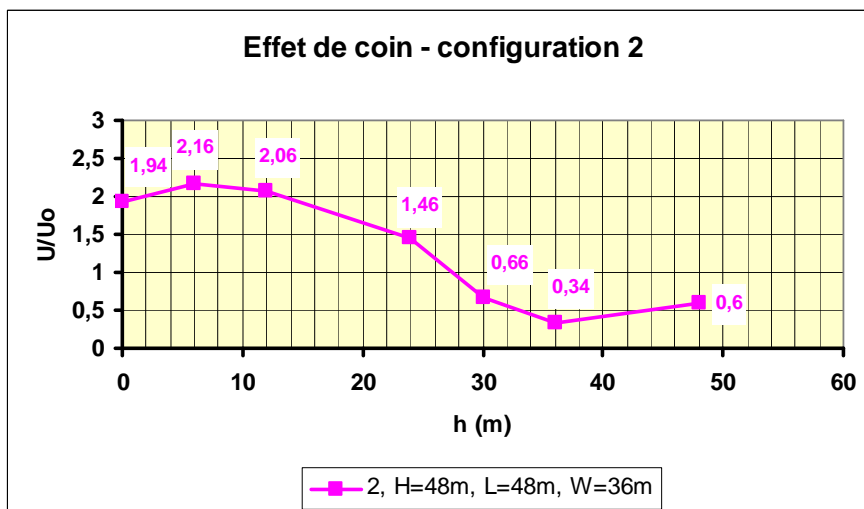
L'inconfort dû à l'effet de coin augmente donc avec la longueur des bâtiments pour cette seconde configuration. Cette augmentation est cependant nettement moins importante que l'accroissement des survitesses lié à l'augmentation de la hauteur du bâtiment. En quadruplant la longueur d'un édifice de 12m à 48 m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.18 alors qu'en doublant seulement sa hauteur de 24m à 48m, on le multiplie par 2.67. De plus, cette augmentation de l'effet de coin en fonction de la longueur des bâtiments diminue progressivement avec l'accroissement de celle-ci. Il est donc évident que pour limiter l'effet de coin, il est préférable de concevoir des bâtiments dont la hauteur soit relativement faible, quelque soit la longueur nécessaire pour répondre au programme architectural.

Nous avons encore analysé l'influence de la distance entre ces deux bâtiments pour situer le moment où le petit bâtiment commence à jouer un effet de masque sur l'effet de coin. Les paramètres fixés sont 48m pour la hauteur et la longueur du bâtiment élevé et 12m pour la hauteur du petit bâtiment.



Cette courbe montre tout d'abord que l'influence du petit bâtiment sur l'effet de coin généré par le grand bâtiment dépend de la distance qui sépare les deux constructions. Si on analyse les résultats avec précision, on peut tirer les conclusions suivantes. Pour une distance entre les deux bâtiments supérieure à 200m (c'est-à-dire $W > 16h$), le petit bâtiment n'a aucune influence sur l'effet de coin au pied du grand bâtiment. Pour une distance entre les deux bâtiments qui diminue progressivement de 16h à 8h, l'effet du premier bâtiment réduit l'effet de coin à l'angle du second bâtiment. Pour une distance entre les deux bâtiments qui diminue progressivement de 8h à 4h, le rapport U/U_o s'accroît : la présence du petit bâtiment est un élément perturbateur et non protecteur. Une distance entre les bâtiments de 4h, semble donc la distance la moins favorable pour l'effet de coin généré au pied du bâtiments élevé de la configuration 2 pour un vent perpendiculaire avec un petit bâtiment de 12m de haut et un grand bâtiment de 48m de haut. Lorsque la distance entre bâtiments passe de 4h à h, l'effet de coin diminue et retrouve un inconfort plus ou moins similaire au bâtiment élevé isolé pour une distance de 2h entre le petit et le grand bâtiment. Enfin, si la distance entre les deux bâtiments est égale ou inférieure à h, on remarque une diminution de l'effet de coin au pied du grand bâtiment.

Le graphe suivant montre l'évolution de la hauteur du petit bâtiment en amont sur l'effet de coin généré au pied d'un bâtiment élevé. La hauteur et la largeur du grand bâtiment sont fixées à 48m et l'inter-distance entre bâtiments à 36m.



Lorsque la hauteur du petit bâtiment augmente d'une hauteur $H/4$ à une hauteur $H/2$ puis $3H/4$, un effet de masque est généré et les survitesses au niveau du coin du bâtiment élevé sont fortement réduites. On voit que l'effet de coin disparaît pour une hauteur h supérieure ou égale à $0.6 H$. Ainsi, diminuer progressivement la taille des bâtiments qui entourent un bâtiment élevé d'une hauteur inférieure ou égale à 0.4 fois la hauteur du bâtiment précédent permet de supprimer les risques d'effets de coins au pied du bâtiment élevé et des édifices qui le précèdent dans la direction du vent.

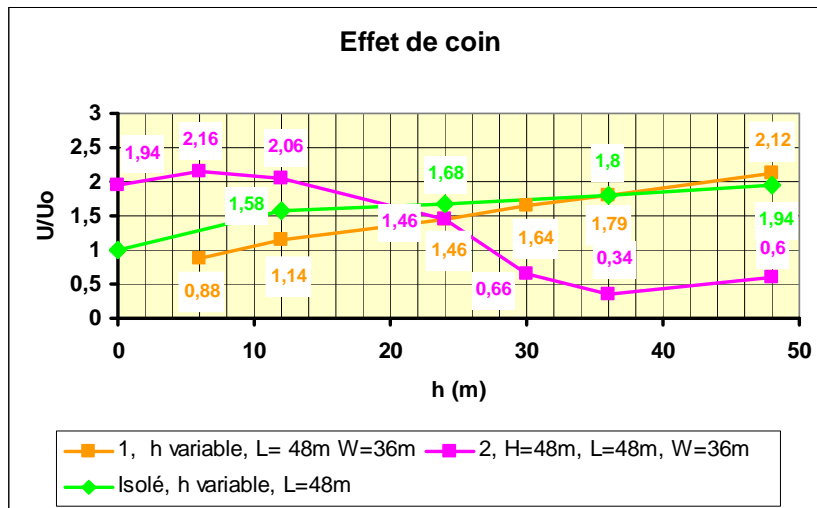
Le cas précédent permet déjà de comprendre l'effet de masque urbain qui se produit pour des tissus denses de hauteur relativement homogène. Ce phénomène bénéfique du point de vue du confort au vent est très répandu dans les villes denses ; il sera analysé dans un paragraphe ultérieur.

Jusqu'ici, nous avons à chaque fois regardé l'influence du petit bâtiment sur l'effet de coin au pied du grand bâtiment. Il ne faut toutefois pas oublier que l'effet de coin existe également au pied du premier bâtiment au vent, même si celui-ci est moins intense. Pour un bâtiment élevé ($H=48\text{m}$), précédé d'un autre bâtiment dont la hauteur varie de 12m à 48m , avec une interdistance constante de 36m , on obtient les valeurs suivantes du rapport de survitesses U/U_0 au coin du premier et du second bâtiment.

Description	Rapport H/h	U/U_0 au coin du premier bâtiment	U/U_0 au coin du second bâtiment
$h=6\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 8$	0.88	2.16
$h=12\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 4$	1.14	2.06
$h=24\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 2$	1.46	1.46
$h=30\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 1.6$	1.64	0.66
$h=36\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 1.33$	1.79	0.34
$h=48\text{m}$; $H=48\text{m}$	$H/h = 1$	2.12	0.6

Comparons ces résultats au fait qu'un bâtiment isolé de 12m de haut crée un effet de coin dont le rapport U/U_0 vaut 1.58 , un bâtiment de 24m un rapport de 1.68 , un bâtiment de 36m un rapport de 1.8 et un bâtiment de 48m un rapport de 1.94 aux coins de la façade au vent. On voit que la présence d'un bâtiment dans son sillage réduit l'effet de coin du premier bâtiment lorsque le rapport H/h est supérieur ou égal à 1.6 . En revanche, lorsque deux bâtiments de même hauteur se suivent, l'effet de coin du bâtiment exposé au vent est amplifié. Pour le second bâtiment, c'est l'effet inverse qui se produit. L'effet de coin du second bâtiment est fortement réduit par le premier bâtiment dès que celui-ci présente une hauteur d'au moins $0.5 H$ et le coin du grand bâtiment est totalement protégé quand un bâtiment d'une hauteur au moins égale à $0.6 H$ le précède. Par contre, l'effet critique du vent au pied du second bâtiment est légèrement amplifié lorsqu'on ajoute un bâtiment de hauteur $H/4$ devant celui-ci.

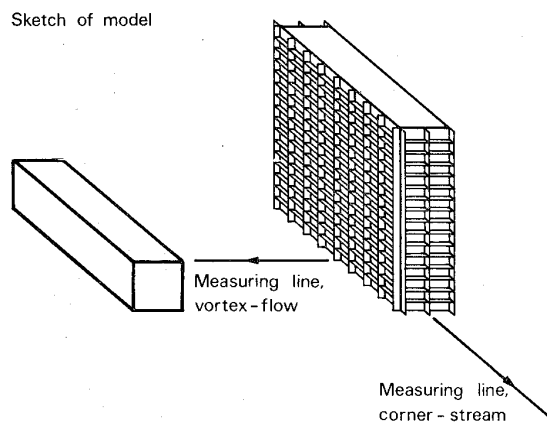
Ces différents cas sont repris dans le graphique ci-dessous. La courbe verte représente la variation de l'effet de coin en fonction de la hauteur d'un bâtiment isolé (configuration 1). La courbe orange représente la variation de l'effet de coin au pied d'un bâtiment exposé au vent suivi d'un bâtiment de 48m de haut dans son sillage (premier bâtiment de la configuration 2). La courbe rose présente la variation de l'effet de coin au pied du bâtiment de 48m de haut en fonction de la hauteur du bâtiment qui le précède (second bâtiment de la configuration 2).



Ainsi, pour un grand bâtiment de 48m de haut et une interdistance entre bâtiments de 36m, la géométrie suivante semble idéale : $1.6 \leq H/h \leq 2.5$, puisque les effets de coins situés au pied du premier et du second bâtiment sont tous les deux diminués par rapport aux cas de bâtiments totalement isolés.

D'après Jamieson & al., pour un bâtiment du double de la hauteur des bâtiments environnants, situé dans un milieu urbain dense, la présence de balcons de 6m de large, tous les 6m de haut sur toute la hauteur de la façade au vent du bâtiment réduit considérablement les vitesses de vent sur une grande région sans aucune augmentation de la vitesse du vent par ailleurs. Ceci est donc un cas extrêmement intéressant pour réduire les survitesses du vent lorsque la fonction du bâtiment le justifie. (Jamieson & al. 1992).

En revanche, les résultats de tests en tunnel à vent réalisés par Penwarden & Wise montrent que la présence de balcons d'1.5m de large sur la façade au vent d'un bâtiment élevé isolé ne modifie pas l'intensité de l'effet de coin au niveau piéton. La zone critique s'est juste écartée du bâtiment d'une longueur d'environ 4 mètres. La situation est toutefois améliorée au pied de la façade et donc à l'emplacement d'une entrée de bâtiment mais les alentours de l'édifice sont tout autant critiques. (Penwarden & Wise 1975).



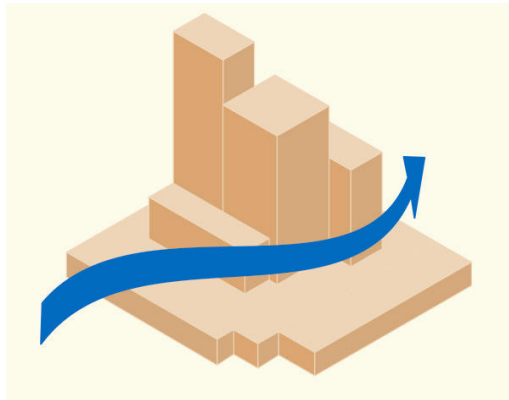
Configuration du bâtiment avec balcons. (Penwarden & Wise 1975)

Enfin, signalons que pour Bottema, la présence d'arbres autour d'un coin ou le fait d'arrondir un coin en diminue l'effet de 10% (Bottema 1993).

Conseils pratiques:

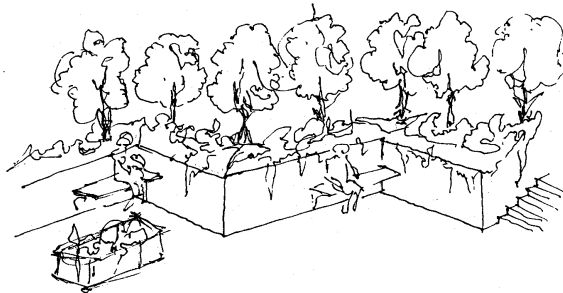
Pour limiter l'effet de coin au pied des bâtiments exposés au vent, on peut donner quelques conseils architecturaux :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout à proximité des coins. Cela peut se faire par exemple par le fait de ceinturer un bâtiment par un élément de hauteur moins élevée : socle, rez-de-chaussée créant une avancée, galerie fermée, ...



(Gandemer 1975).

- **densifier le voisinage** immédiat du bâtiment élevé par des constructions moins élevées, dont le rapport de hauteur devrait idéalement se situer dans l'intervalle suivant : $1.6 \leq H/h \leq 2.5$
- **créer de larges débords** (balcons de 6m de profondeur,...) sur toute la façade au vent du bâtiment.
- **couper les angles** du bâtiment élevé à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau du coin.
- **prévoir des éléments poreux** près des angles du bâtiment élevé (végétation, écrans perméables,...). Ces dispositifs ralentiront la vitesse moyenne de l'air et atténueront l'effet du gradient de vitesse. Une haie de 2m de haut est un brise-vent efficace pour les piétons de par sa perméabilité naturelle.



(Hammoud 1986).



(Glaumann & Westerberg 1988).

- **protéger les balcons** situés aux coins des bâtiments.



Vauban (IMBE 2005).

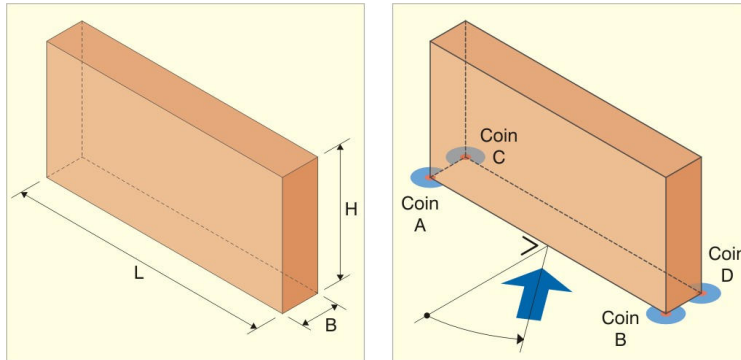
A retenir...

La vitesse maximale de l'effet de coin est peu influencée par l'angle d'incidence du vent par rapport au bâtiment élevé (différence de 15%). En revanche, la position de cet effet critique dépend fortement de l'angle d'incidence du vent.

La hauteur du bâtiment est le paramètre essentiel qui influence l'effet de coin pour un bâtiment isolé. Au plus la hauteur du bâtiment est élevée, au plus l'inconfort se fait sentir.

Dans le cas de deux bâtiments parallèles, un effet de protection au pied des coins des deux bâtiments apparaît lorsque le premier bâtiment présente une hauteur comprise entre 0.4 et 0.6 fois la hauteur du second bâtiment dans la direction du vent.

4.4.2 L'effet de cisaillement

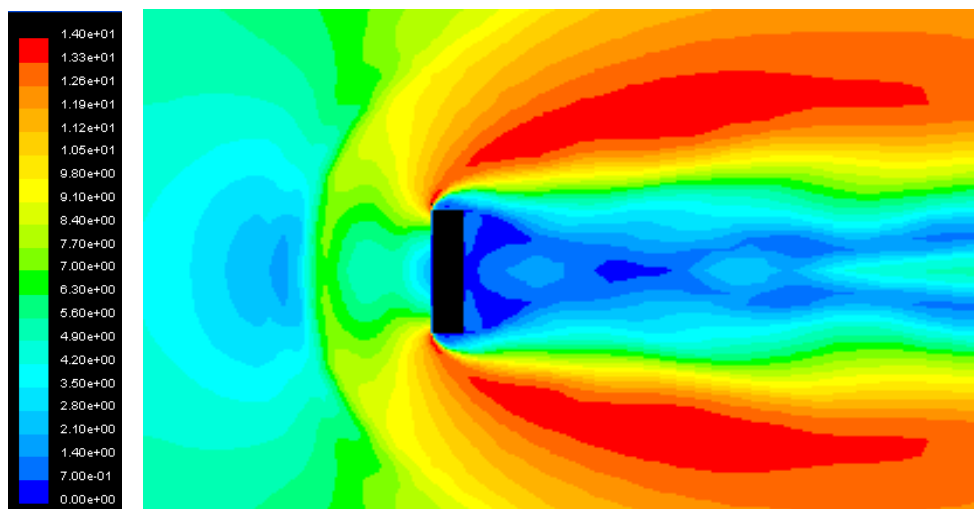


L'effet de cisaillement couvre les zones à fort gradient de vitesse de vent qui entourent la zone de protection due au sillage du bâtiment. Ces couches de cisaillement présentent de taux de turbulence élevés.

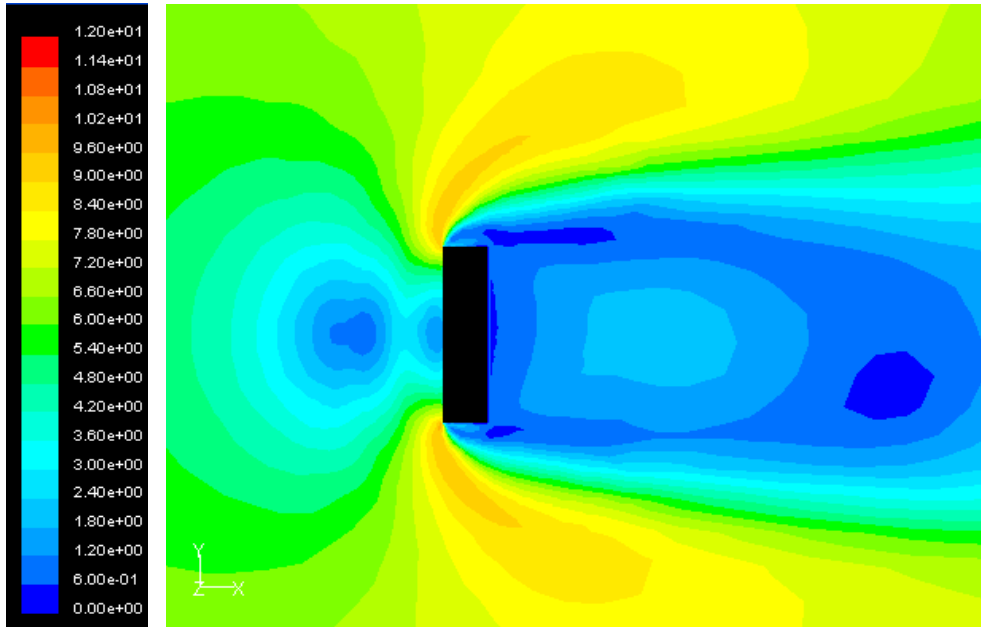
Dans le cas de l'effet de cisaillement, la valeur quantitative des survitesses n'a pas été analysée puisque le point le plus critique se trouve au niveau du coin du bâtiment et a été étudié sous le terme d'effet de coin. Si on réduit les survitesses au niveau de l'effet de coin, on obtiendra forcément une diminution des vitesses de l'air dans les couches de cisaillement.

Ainsi, on peut estimer que la vitesse de l'air dans les couches de cisaillement est peu influencée par l'angle d'incidence du vent par rapport au bâtiment élevé et que la hauteur du bâtiment est le paramètre essentiel qui influence l'effet de cisaillement pour un bâtiment isolé. Au plus la hauteur d'un bâtiment est élevée, au plus les risques d'inconfort pour les piétons augmentent au niveau de son sillage.

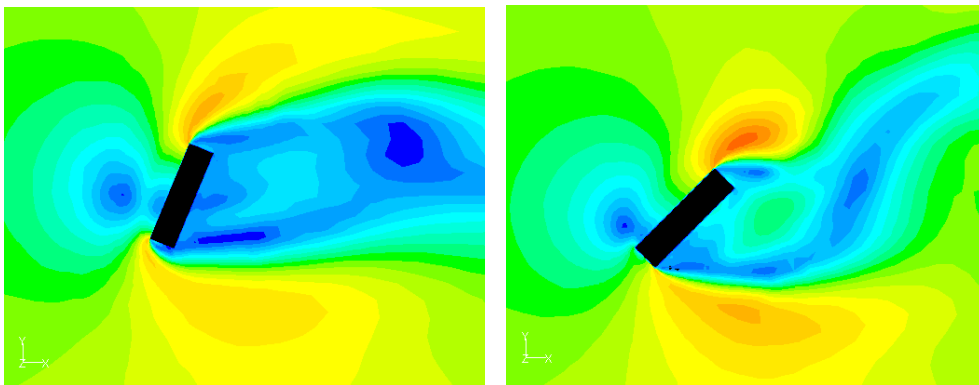
Signalons que l'accroissement de la hauteur des bâtiments n'a pas seulement un effet de renforcement des survitesses au niveau du coin et dans la zone de cisaillement mais qu'il augmente également la longueur de la zone de cisaillement où les survitesses sont importantes. Le graphique ci-dessous montre le sillage d'un bâtiment de 96m de haut et les zones de cisaillement qui l'encadrent. On remarque la forme caractéristique en forme de fer à cheval des couches de cisaillement dans le sillage des bâtiments élevés.



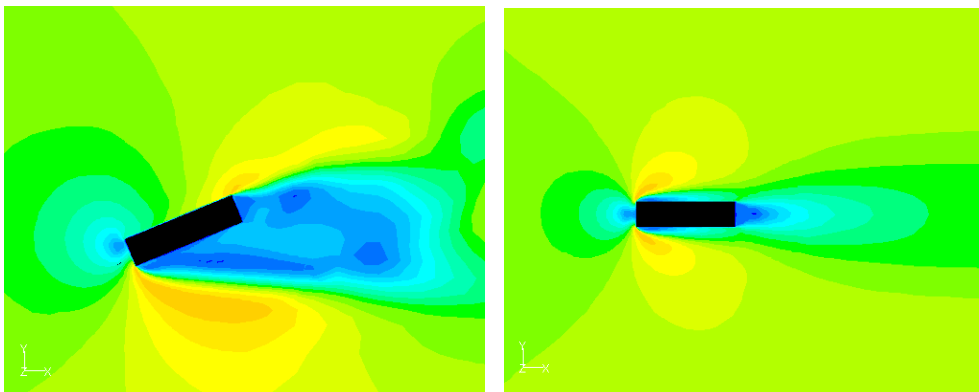
Les graphes ci-dessous donnent la répartition des survitesses moyennes générées dans le sillage d'un bâtiment de 48m de haut, de 48m de long et de 12m de large au niveau des piétons (à 1.5 m du sol), lorsque l'angle d'incidence α varie de 0° à 90° dans le sens antihorlogique. La même échelle des vitesses de l'air est valable pour les différents graphiques.



Courbes iso-vitesses pour un angle d'incidence du vent $\alpha = 0^\circ$



Courbes iso-vitesses pour $\alpha = 22.5^\circ$ (à gauche) et $\alpha = 45^\circ$ (à droite)



Courbes iso-vitesses pour $\alpha = 67.5^\circ$ (à gauche) et $\alpha = 90^\circ$ (à droite)

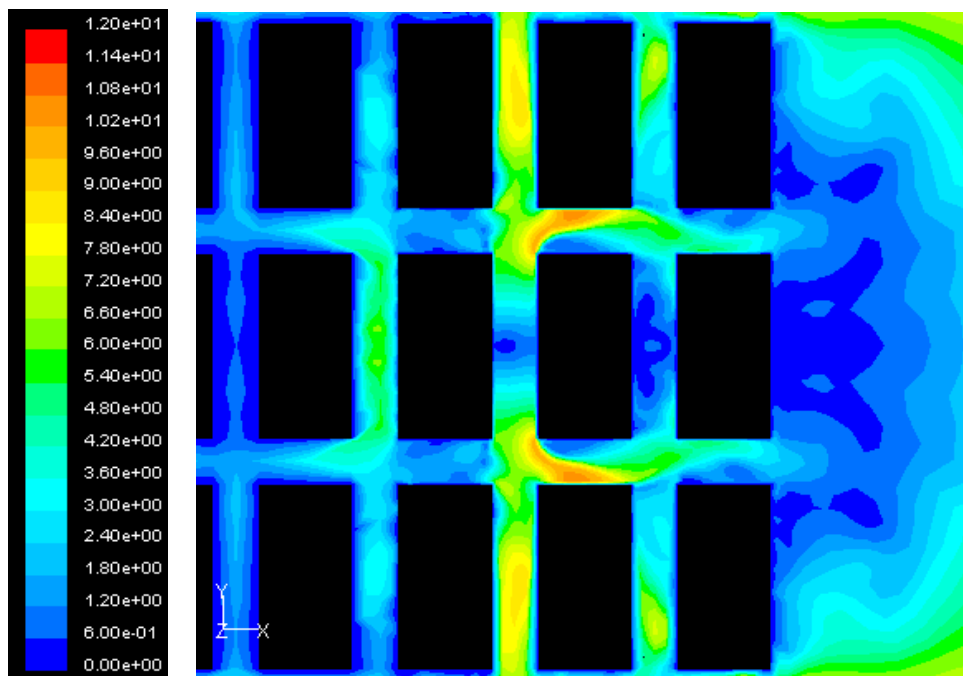
Attention les graphes ci-dessus donnent une solution moyenne qui semble ainsi permanente alors qu'en réalité le sillage généré par l'écoulement du vent autour d'un bâtiment est instationnaire. Ainsi, le mouvement temporel du sillage autour de sa position moyenne crée un agrandissement de la zone d'inconfort expérimentée dans un ensemble concret par rapport aux simulations présentées. Il serait donc judicieux de réaliser dans le futur des simulations temporelles afin de pouvoir mettre en évidence les cycles dynamiques des écoulements qui se produisent autour des bâtiments.

L'effet de cisaillement génère une surface de grande dimension qui est inconfortable pour les piétons. Il est donc utile de réduire non seulement l'intensité des survitesses maximales mais aussi la surface de la zone inconfortable.

Le positionnement des couches de cisaillement par rapport au bâtiment et les dimensions de la zone pour laquelle la vitesse de l'air est élevée dépendent fortement de l'angle entre la direction du vent et l'orientation du bâtiment. Les résultats de simulations présentés ci-dessus permettent d'affirmer qu'une méthode pour réduire la surface des couches de cisaillement est d'orienter le bâtiment élevé de manière judicieuse.

Il faut éviter les façades de grande longueur faisant face au vent dominant. Une orientation des façades principales de façon à ce que l'incidence du vent dominant soit comprise entre 60° et 120° permet déjà de réduire la zone de cisaillement de manière importante mais l'idéal consiste à placer la façade la plus longue parallèlement au flux du vent dominant.

Le schéma ci-dessous montre l'effet de cisaillement d'un bâtiment de 76m de haut au sein d'un milieu urbain formé de blocs homogènes de 19m de haut, 100 m de long et 50m de large.



Ainsi, tous les obstacles (bâtiments, végétation,...) qui sont placés directement dans la zone de cisaillement réduisent fortement cet effet critique.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de cisaillement dans le sillage des bâtiments exposés au vent, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout à proximité des coins.
- **densifier le voisinage immédiat du bâtiment élevé** (à la fois en amont de celui-ci et dans les zones de cisaillement) par des constructions moins élevées. En effet, plus l'environnement bâti est dense, plus l'effet de sillage est atténué.
- **prévoir des éléments poreux** près des angles du bâtiment élevé et dans la zone de cisaillement (végétation, écrans perméables,...). Des aménagements végétaux brisent aisément l'effet de cisaillement.
- **orienter le bâtiment élevé** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant par rapport à la façade principale soit compris entre 60° et 120° , avec une position idéale du bâtiment **parallèlement au flux du vent dominant** (c'est-à-dire pour une incidence du vent de 90°).

A retenir...

Si on réduit les survitesses au niveau de l'effet de coin, on obtiendra forcément une diminution des vitesses de l'air dans les couches de cisaillement.

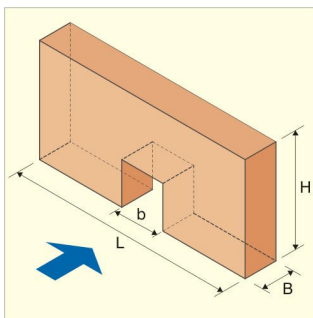
La hauteur du bâtiment influence fortement l'effet de cisaillement pour un bâtiment isolé, tant au niveau de l'intensité des survitesses qu'au niveau de la taille de la zone critique pour les piétons. Au plus la hauteur du bâtiment est élevée, au plus l'inconfort se fait sentir.

Placer des obstacles (bâtiments, végétation,...) dans la zone de cisaillement réduit fortement cet effet critique.

Une orientation de **l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents dominants** est la position idéale pour limiter leur effet de cisaillement

4.4.3 L'effet de passage sous immeuble

Pour étudier l'effet de passage sous immeuble, j'ai réalisé des simulations d'un bâtiment percé au niveau du sol par un passage pour piétons.

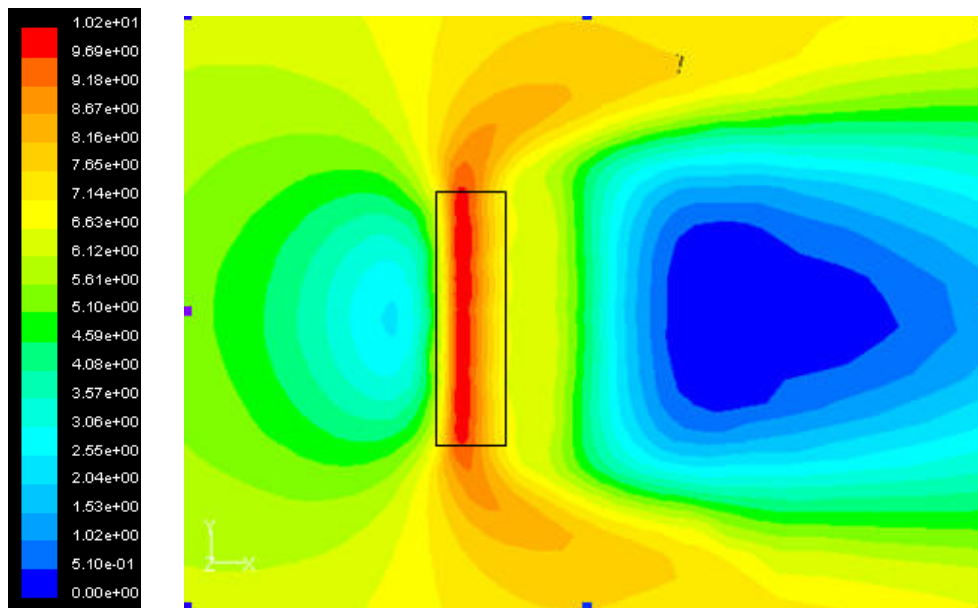


Passage sous immeuble

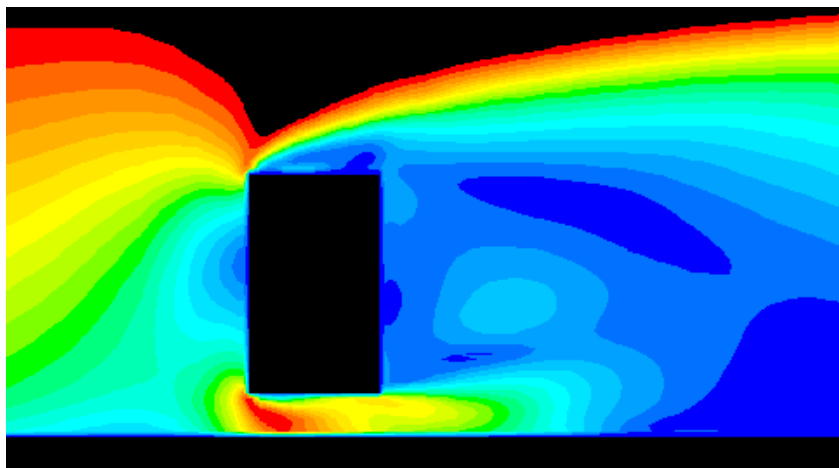
Les deux configurations suivantes ont été étudiées :

- un trou sous immeuble (de 6m de large et 4m de haut) creusé au centre du bâtiment.
- un bâtiment sur pilotis, c'est-à-dire un passage sous immeuble de 4m de haut et d'une largeur b égale à la longueur L du bâtiment.

Le graphique ci-dessous montre l'effet de passage sous immeuble pour le bâtiment sur pilotis. Le bâtiment simulé mesure 24m de haut, 48m de long et 12m de large, pour un angle d'incidence du vent de 0° . Il s'agit de la distribution des vitesses moyennes du vent en plan à 1.5m de haut et en coupe au centre du passage sous immeuble. L'échelle sur le côté gauche, qui est valable pour les deux graphes présentés, donne la vitesse moyenne du vent en m/s. Le rectangle noir indique la position en plan du bâtiment (de 6m à 48m de haut).



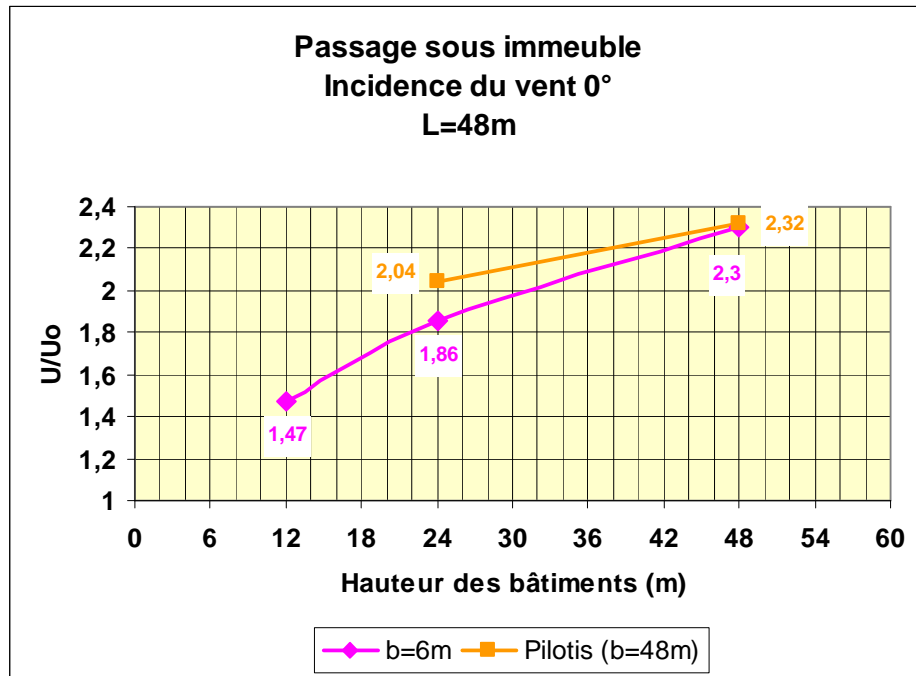
Distribution des vitesses de l'air à 1.5 m du sol.



Distribution des vitesses de l'air en coupe au milieu du passage sous immeuble.

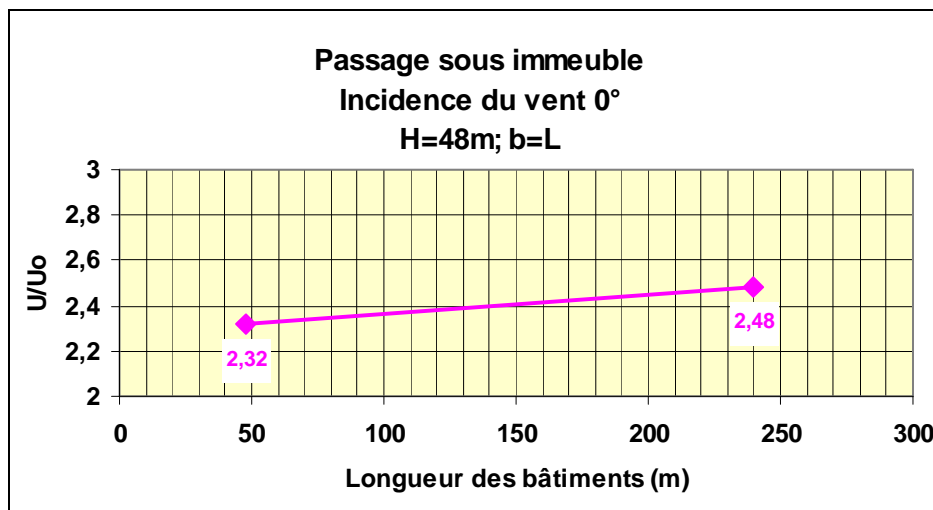
Ces résultats de simulation montrent que la zone critique de l'effet de passage sous immeuble commence quelques mètres avant le passage et se prolonge à l'arrière du bâtiment sur une longueur environ égale à la longueur du passage (= profondeur du bâtiment) et une largeur égale à la largeur du passage, quelque soit la hauteur du bâtiment et la largeur du passage.

Le graphe ci-dessous permet de constater que le rapport U/U_0 maximal au centre du passage augmente fort avec la hauteur du bâtiment, quelque soit la largeur du passage. Ces valeurs montrent que l'effet de passage sous immeuble est l'effet le plus critique pour une hauteur de bâtiment supérieure à 20m. C'est une configuration à abandonner dès qu'on construit un bâtiment élevé.

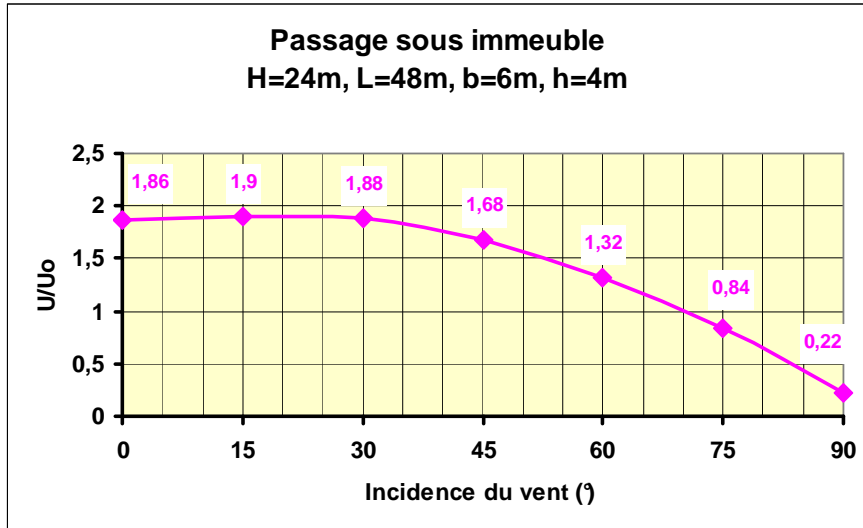


Les bâtiments sur pilotis présentent une accélération du vent au niveau du passage sous immeuble supérieure à la vitesse du vent dans un passage étroit mais cette différence diminue avec l'accroissement de la hauteur du bâtiment. Notons aussi que pour le passage sur pilotis, la valeur de survitesses donnée ici pour le centre du bâtiment reste en fait environ constante sur 90% de la largeur du passage (= 0.9 L). L'effet critique du vent pour les piétons occupe donc une surface de grande dimension.

Le graphe ci-dessous donne les valeurs quantitatives des survitesses au niveau piéton sous un bâtiment sur pilotis de 48m et de 240m de long, avec une hauteur constante 48m de haut. Pour une incidence du vent de 0°, la longueur du bâtiment ne semble pas avoir une influence importante sur l'effet de passage sous immeuble.

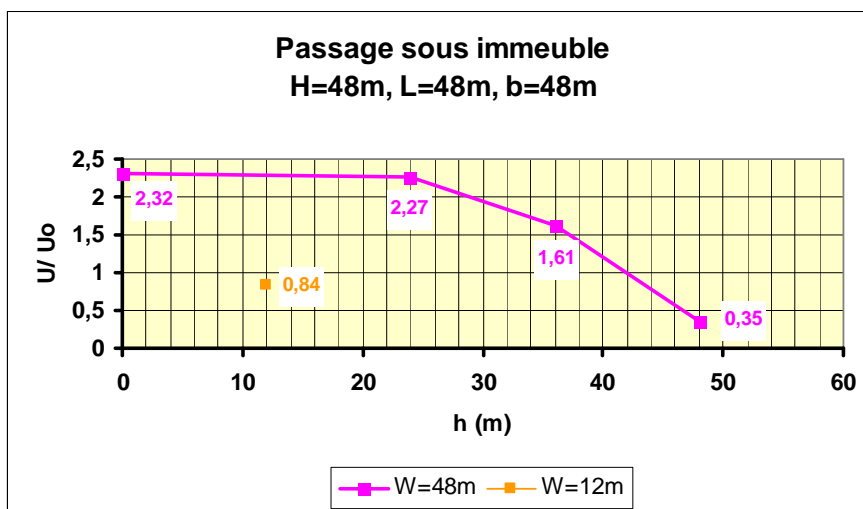


Les valeurs ci-dessous donnent la courbe d'influence de l'orientation du vent sur le rapport U/U_0 maximal au centre du passage pour piéton avec un bâtiment de 48m de long et de 24m de haut et un passage de 6m de large et 4m de haut. L'angle d'incidence de 0° correspond à un vent qui est parallèle au passage sous immeuble. Les vitesses de vent maximales à l'intérieur du passage piétonnier se produisent pour un angle d'incidence du vent de 15° à proximité du coin du passage.



Ce graphe nous permet de constater que l'effet de passage sous immeuble est surtout critique pour des incidences du vent de 0 à 45° par rapport à l'axe du passage. Pour une incidence supérieure à 70° , le passage devient une zone protégée par rapport à l'écoulement du vent. L'incidence du vent par rapport au trou joue donc un rôle capital sur l'intensité de l'effet de passage sous immeuble. Pour un bâtiment sur pilotis, il est difficile de donner un graphe de l'effet de trou sous immeuble en fonction de l'orientation du vent car cela dépend de la forme des pilotis. S'il s'agit de colonnes minces, l'orientation du vent ne devrait pas avoir d'impact important sur l'intensité de l'effet de passage sous immeuble. En revanche, s'il s'agit de pilotis massifs de grande longueur, ils auront un effet de brise-vent d'autant plus marqué que l'orientation du vent se rapproche de la direction perpendiculaire à leur longueur.

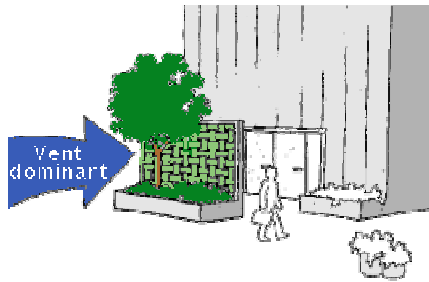
Le graphe ci-dessous permet de quantifier l'effet de protection d'un bâtiment placé avant l'entrée du passage exposée au vent par rapport à cet effet critique.



Un bâtiment placé en amont du passage sous immeuble crée une zone de protection par rapport au vent dans le passage sous immeuble lorsque le rapport h/W est supérieur ou égal à 1, c'est-à-dire quand la hauteur du petit bâtiment est supérieure ou égale à la distance qui sépare les deux bâtiments.

Plusieurs solutions spécifiques ont été testées en tunnel à vent par différents auteurs pour réduire l'effet critique du vent dans les passages sous immeubles. Ces solutions n'ont toutefois pas fait l'objet d'une évaluation quantitative à l'aide de FLUENT. Leurs principes semblent logiques mais nous ne pouvons pas garantir l'intensité de l'effet de protection généré. De telles applications nécessiteraient une étude spécifique.

La présence d'un brise-vent à l'entrée du passage ou à l'intérieur de celui-ci réduit les survitesses du vent dans les passages sous immeubles.



Brises-vents.

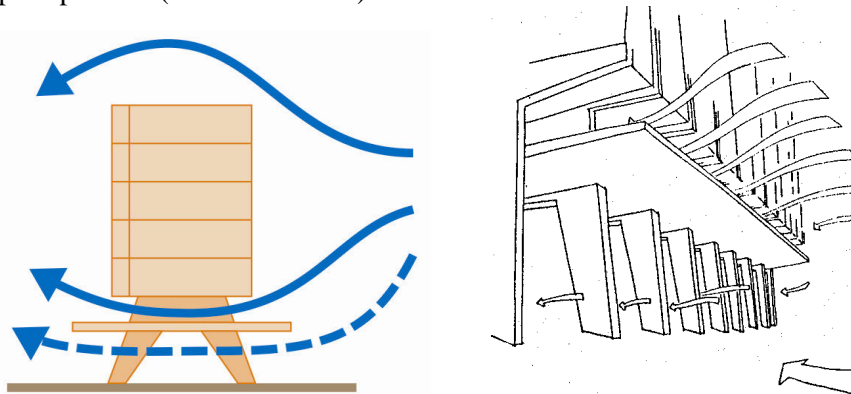


(Photo : S. Reiter)

Wiren suggère de décaler les étages supérieurs et les étages inférieurs, par exemple par le fait de ceinturer un bâtiment par un élément de hauteur moins élevée : socle, rez-de-chaussée créant une avancée de la galerie fermée, ... Il a quantifié l'influence d'un portique de 3m de long prolongeant le passage du côté de la façade au vent et il obtient ainsi une réduction de 6% de la survitesse maximale dans le passage pour piétons. (Wiren 1975)

Penwarden & Wise ont analysé l'effet de protection d'un auvent placé de chaque côté du passage sous immeuble. Du côté de la façade au vent, l'auvent supprime les survitesses dans le passage dès que sa profondeur est supérieure ou égale à 6m. Du côté sous le vent du bâtiment, l'auvent est inutile. (Penwarden & Wise 1975)

Gandemer propose la solution suivante pour limiter l'effet critique du vent pour les piétons traversant un passage sous immeuble: diviser le flux d'air au pied de l'immeuble par une augmentation de la porosité du bâtiment au-dessus du passage pour piétons. (Gandemer 1975)



(Gandemer 1975)

Dans le cas d'un passage suffisamment important (environ 5 à 6 m de hauteur), ce principe de protection consiste à diviser le trou en deux canaux : la partie supérieure est destinée à permettre à l'écoulement de l'air de traverser le bâtiment sans gêner les piétons alors que la partie inférieure sera protégée au maximum. Une avancée de la surface de division du passage de plusieurs mètres avant la façade au vent et/ou l'utilisation de surfaces poreuses à l'entrée du passage renforcent encore l'efficacité de ce système. (Gandemer & Guyot 1981).

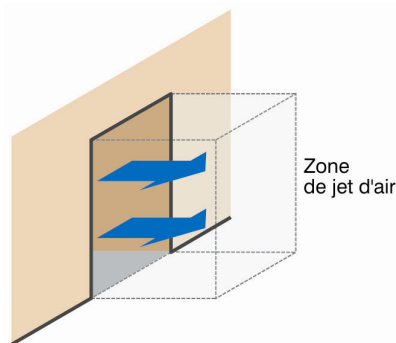
Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de passage sous immeuble, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout du côté du passage sous immeuble le plus exposé au vent dominant.
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport à la façade au vent percée par le passage sous immeuble. L'orientation idéale correspond à un vent parallèle à la façade percée par le passage pour piétons.
- **protéger le passage sous immeuble par un bâtiment** d'une hauteur au moins égale à la distance qui le sépare de l'entrée du passage sous immeuble ($h/W \geq 1$).
- **protéger le passage sous immeuble par un auvent** de plusieurs mètres devant la face au vent percée du passage.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) à l'entrée du trou sous immeuble ou à l'intérieur de celui-ci.
- **diviser le passage en hauteur** de manière à créer un couloir de déviation du vent au-dessus du passage pour piétons.

A retenir...

La zone d'inconfort liée à la présence d'un passage sous immeuble débute quelques mètres avant la façade au vent du bâtiment et se prolonge au-delà du passage par un jet d'air à grande vitesse dont le volume est du même ordre de grandeur que le passage. Au-delà de la zone de jet, on retrouve une zone de grande protection au vent correspondant au sillage du bâtiment.



(Gandemer 1975).

La hauteur du bâtiment influence fortement l'effet de passage sous un immeuble isolé. Le rapport U/U_0 au niveau des piétons (à 1.5m de haut) dans les passages sous immeubles augmente fortement avec une hauteur croissante des bâtiments.

Les survitesses dans le passage augmentent très légèrement avec l'accroissement de la largeur de l'ouverture.

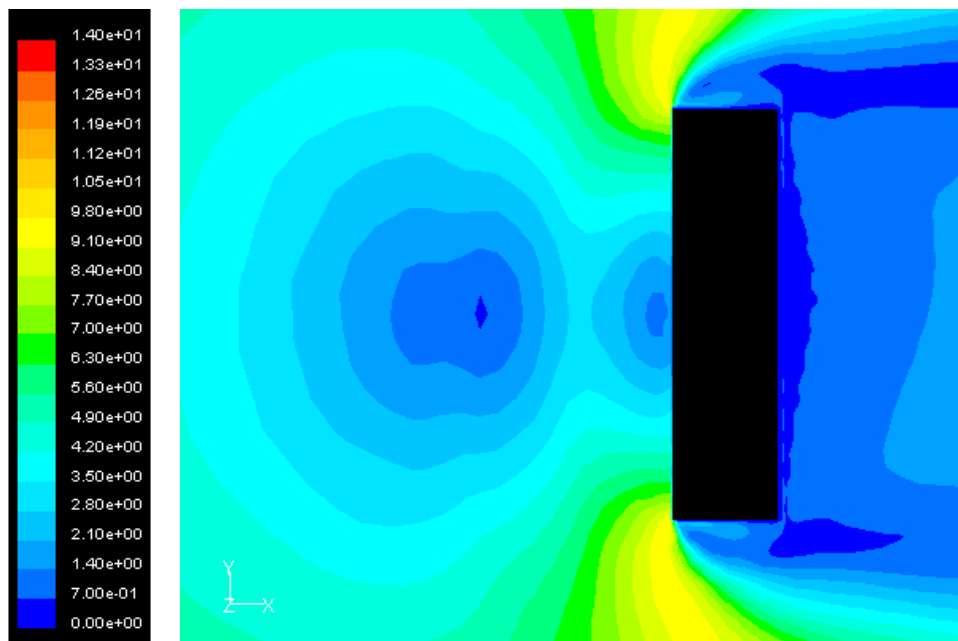
L'effet critique généré dans les passages étroits est très sensible à la direction du vent, ce qui n'est pas toujours le cas pour des bâtiments sur pilotis. Cet effet est surtout critique pour des incidences du vent de 0 à 45° par rapport à l'axe du passage étroit. **Pour une incidence du vent supérieure à 70°, le passage étroit devient une zone protégée par rapport à l'écoulement du vent.** Les pilotis peuvent jouer dans certains cas le rôle de brise-vent.

Un bâtiment placé en amont du passage crée une zone de protection par rapport au vent dans le passage sous immeuble lorsque la hauteur du petit bâtiment est supérieure ou égale à la distance qui sépare les deux bâtiments.

4.4.4 Le rouleau tourbillonnaire

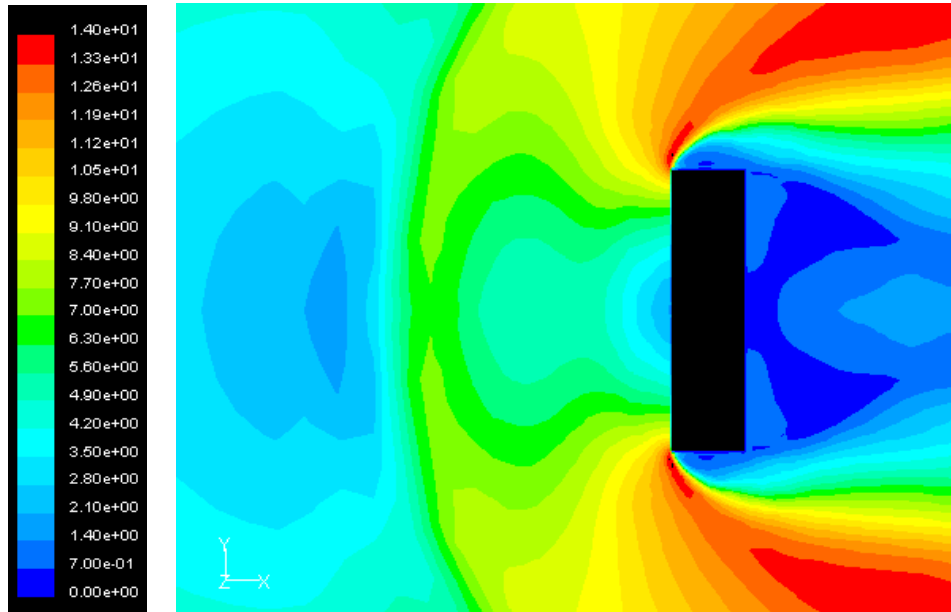
L'effet tourbillonnaire est simulé pour un bâtiment élevé isolé de hauteur H , de longueur L et de largeur B .

À l'avant de la face au vent des bâtiments se constitue un espace de recirculation de l'air. Pour la majorité des bâtiments, ce phénomène génère une zone protégée du vent, où les vitesses de l'air sont faibles. C'est ce qu'on voit ci-dessous pour un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large. La zone bleue au pied de la façade au vent du bâtiment est donc une zone de grand calme aérodynamique : le rapport U/U_0 y est égal ou inférieur à 0.58.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

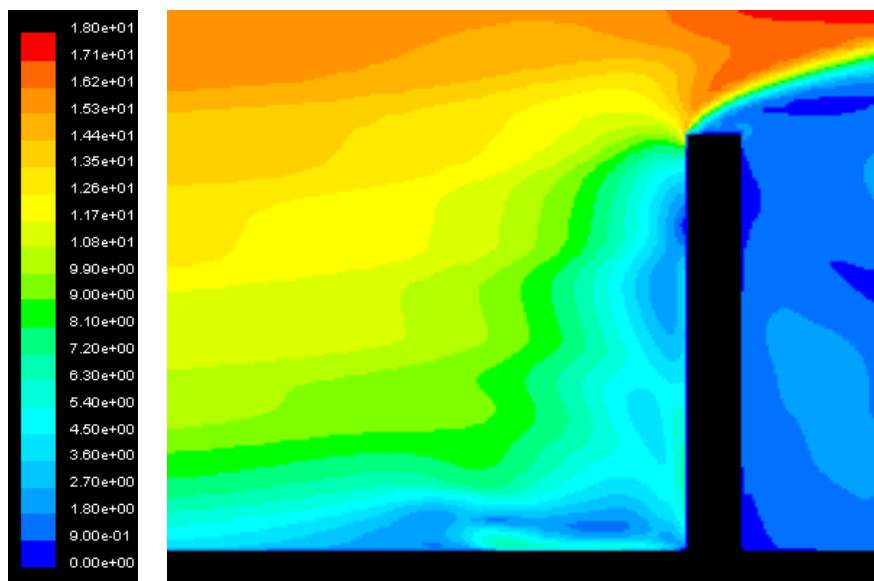
En revanche, pour de très hauts bâtiments, cette zone de protection existe mais elle est réduite et coupée en deux par une surface où les vitesses de l'air sont importantes. La zone verte sur le graphique ci-dessous correspond à la zone de survitesses que constitue le rouleau tourbillonnaire pour les bâtiments très élevés. Dans le cas de ce bâtiment de 96m de haut, 48m de long et 12m de large, le rapport U/U_0 atteint, sur l'axe médian du bâtiment, une valeur de 1.36 due à cet effet tourbillonnaire.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

Le plan ci-dessus montre bien que l'effet tourbillonnaire au pied des bâtiments très élevés reste toutefois largement moins critique que l'effet de coin généré par un bâtiment de même hauteur.

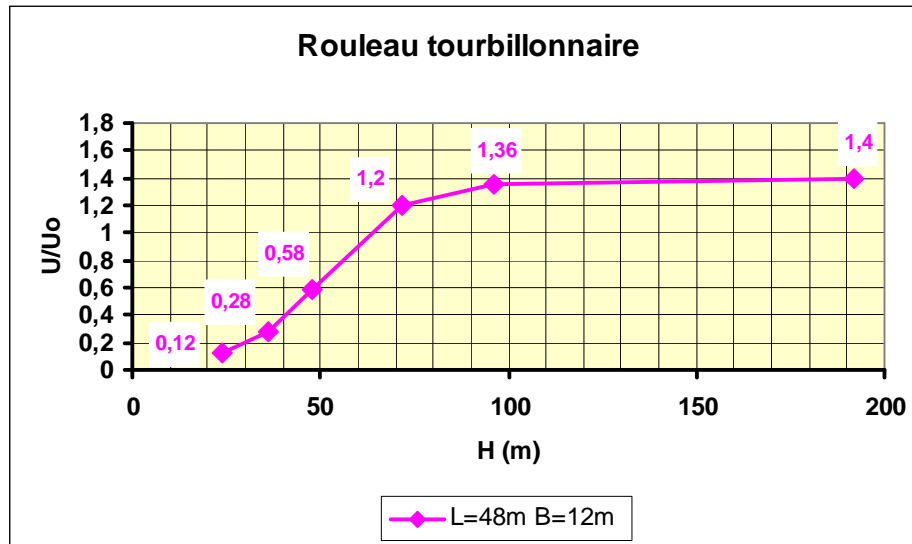
La coupe ci-dessous représente l'écoulement du vent autour de ce bâtiment de 96m de haut, 48m de long et 12m de large. Cette coupe a été réalisée au centre du bâtiment. Attention : l'échelle des vitesses n'est pas identique sur le plan et la coupe.



Courbes iso-vitesses en coupe.

La coupe ci-dessus montre bien que l'effet de rouleau tourbillonnaire a lieu sur une hauteur équivalente à la moitié de la hauteur du bâtiment à partir du sol.

Pour évaluer l'effet de la hauteur du bâtiment élevé sur le confort au niveau piéton devant la face au vent du bâtiment, des simulations ont été réalisées avec différentes hauteurs H pour un bâtiment de 48m de long et de 12m de large, avec un vent perpendiculaire à la façade principale. Le graphe ci-dessus donne le rapport U/U_0 maximal du rouleau tourbillonnaire au pied d'un bâtiment de 48m de long pour des hauteurs H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m, et 192m.



Le rouleau tourbillonnaire est un effet du vent qui ne crée des survitesses locales que pour les bâtiments très élevés, d'une hauteur supérieure à 60m. D'autre part, au-dessus de 100m de haut, l'effet semble totalement déployé et n'augmente plus que très légèrement avec l'accroissement de la hauteur du bâtiment. Cependant, il faut souligner le fait que cet effet est important spatialement puisqu'il s'étend tout le long de la face à vent du bâtiment et sur une profondeur de 50m pour un bâtiment de 100m de haut.

Ces résultats quantitatifs des survitesses générées par le rouleau tourbillonnaire au pied des bâtiments montrent en fait que ce phénomène n'est pas vraiment critique. En effet, en Belgique (sauf à la Côte où les vitesses moyennes du vent sont plus élevées), un rapport U/U_0 égal ou inférieur à 1.4 est tout-à-fait acceptable pour une zone de détente pour laquelle le risque d'inconfort par rapport au vent doit rester inférieur à 5% du temps. Cependant, il faut rappeler que le tourbillon engendre une forte augmentation de la turbulence au sol, ce qui augmente la sensation d'inconfort pour les piétons.

Ce phénomène peut donc augmenter les probabilités cumulées d'inconfort par rapport à d'autres effets critiques du vent mais il ne sera la seule cause de problème aérodynamique que pour des bâtiments très élevés ($H > 60m$) ou des climats très venteux.

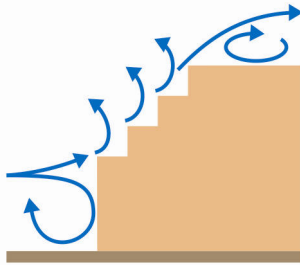
De plus, pour les bâtiments inférieurs à 50m de haut, il y a une zone de protection au vent marquée devant la face au vent d'un bâtiment isolé. Pour un bâtiment de moyenne hauteur exposé au vent, il serait donc très judicieux de concevoir l'entrée du bâtiment, la terrasse d'un café ou une zone de repos au niveau piéton vers le centre de la façade avant plutôt que sur ses bords, sujets à l'effet de coin qui est critique même pour des hauteurs de bâtiments peu élevées. Vu les très faibles

vitesses de l'air prévues pour des bâtiments inférieurs à 50m de haut, l'effet de la turbulence n'engendre dans ce cas aucun inconfort spécifique.

Conseils pratiques:

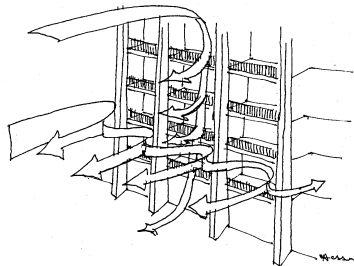
Pour limiter l'effet de rouleau tourbillonnaire au pied des bâtiments très élevés ($H > 60m$), on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, par exemple en créant un jeu de niveaux en gradin.



(Hammoud 1986)

- **intégrer des toits à versants inclinés** dans la direction du vent dominant.
- **augmenter la porosité ou la rugosité des façades** exposées directement au vent. D'une part, des trous peuvent être créés dans la façade pour casser le tourbillon d'air descendant. D'autre part, les balcons et les décrochements d'au moins 2 m de profondeur freinent les courants descendants, assurant une vitesse de l'air confortable au niveau piéton. La figure ci-dessous montre le freinage du courant d'air par un jeu de décrochements. Les balcons doivent toutefois être protégés latéralement pour ne causer aucun risque pour les habitants de l'immeuble. Les décrochements verticaux participent à la réduction des tourbillons au pied de l'immeuble.



(Hammoud 1986)

A retenir...

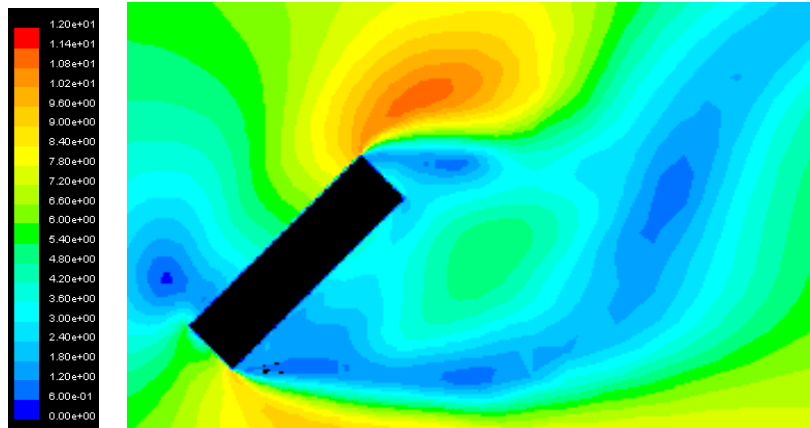
L'effet de rouleau tourbillonnaire a lieu sur une hauteur équivalente à la moitié de la hauteur du bâtiment à partir du sol.

Le rouleau tourbillonnaire n'est réellement critique que pour des bâtiments très élevés ($H > 60m$) ou des climats très venteux. Pour les bâtiments très élevés, l'augmentation de la turbulence dans la zone du rouleau tourbillonnaire doit être prise en considération comme un élément qui accroît l'inconfort des piétons.

Pour les bâtiments inférieurs à 50m de haut, il y a une zone de protection au vent marquée devant la face au vent d'un bâtiment isolé.

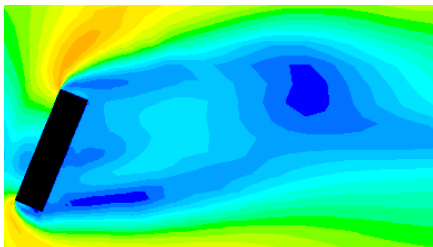
4.4.5 L'effet de barre

Le schéma ci-dessous montre l'effet de barre pour un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large. L'effet de protection dans le sillage du bâtiment (zone bleue) est annulé par l'effet de barre (zone verte) lorsque le vent passe au-dessus d'un bâtiment élevé sous une incidence de 45°.

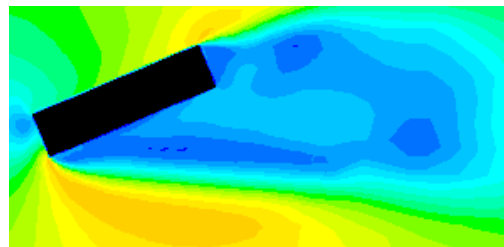


Incidence du vent $\alpha=45^\circ$

Les graphes ci-dessous montrent les courbes iso-vitesses pour le même bâtiment (H=48m, L=48m, B=12m) et la même échelle de vitesses de l'air mais selon des orientations du vent différentes. Ces schémas prouvent qu'une incidence du vent de 22.5° ou de 67.5° par rapport à la façade principale au vent suffit à supprimer la zone d'accélération du vent due à l'effet de barre. L'effet de barre est un effet du vent qui se produit exclusivement pour une incidence du vent plus ou moins égale à 45° par rapport à la façade.

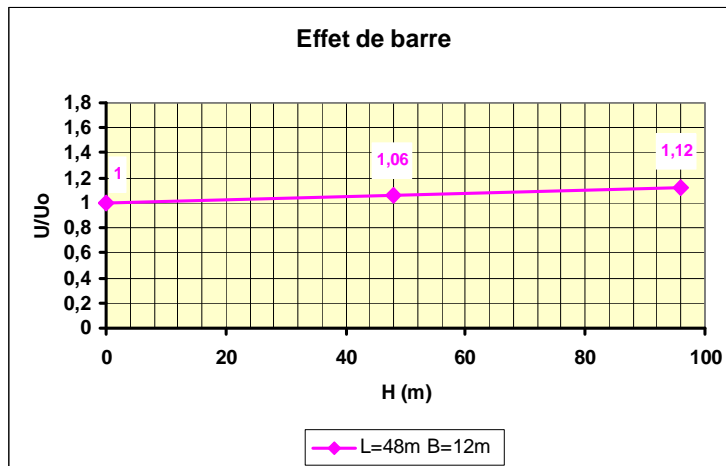


Incidence du vent $\alpha=22.5^\circ$



Incidence du vent $\alpha=67.5^\circ$

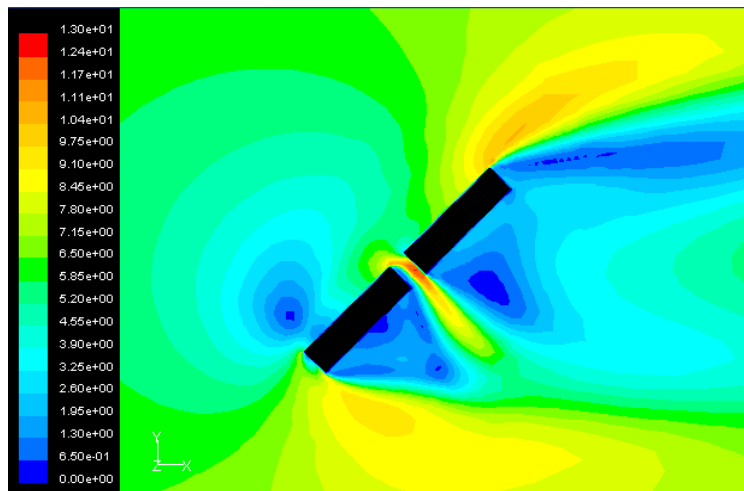
Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 pour l'effet de barre en fonction de la hauteur du bâtiment.



L'effet de barre ne génère pas d'inconfort au niveau piéton. Il annule toutefois l'effet de protection dû au sillage du bâtiment. Il est donc judicieux d'éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons. La position de l'effet de barre est d'autant plus éloignée de la façade arrière du bâtiment que sa hauteur est importante.

Pour deux bâtiments de 48m de haut orientés à 45° par rapport au vent dominant dont l'un est long de 48m et l'autre de 96m, l'effet de barre est identique et vaut 1.06. La longueur du bâtiment n'a donc pas d'impact sur l'intensité de l'effet de barre. En revanche, la position de l'effet de barre est d'autant plus éloignée de la façade arrière du bâtiment que sa longueur est importante.

Un effet de coin peut aussi être généré par l'assemblage de différents bâtiments en une barre longiligne continue (bâtiments mitoyens). Lorsque des espacements existent entre les bâtiments, l'effet de barre laisse la place à un autre effet critique du vent : l'effet de double coin, qui est spécialement critique pour le confort des piétons. Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut et de 48m de long placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage de 8m. Dans ce cas, l'effet de barre semble anodin par rapport à cet effet spécialement critique pour les piétons. Ce phénomène est étudié dans le paragraphe sur l'effet de double coin. Notons l'inconfort généré dans la zone de protection à l'arrière des bâtiments à cause du jet d'air venant du passage entre immeubles.



Conseil pratique:

Pour limiter l'effet de barre dans le sillage d'un bâtiment de grande longueur, il faut éviter d'orienter le bâtiment à 45° par rapport au vent dominant.

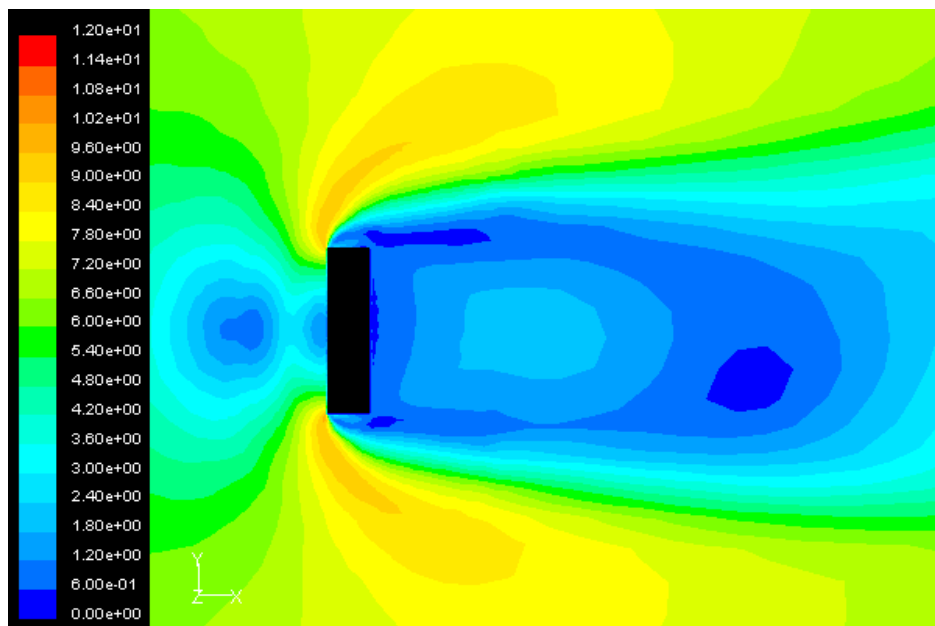
A retenir...

L'effet de barre ne génère pas d'inconfort au niveau piéton. Il annule toutefois l'effet de protection dû au sillage du bâtiment. Il est donc judicieux d'éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons.

4.4.6 L'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé

A l'arrière d'un bâtiment isolé exposé au vent se développe une large zone de protection par rapport au vent, appelée le sillage. Dans cette zone, la turbulence du vent est généralement forte mais elle n'est pas inconfortable pour les piétons à cause de la très faible vitesse de l'air à cet endroit. La géométrie du sillage est donc importante à évaluer puisque c'est une région spécialement adéquate pour y développer des zones de détente tels que places, terrasses de café, jardins publics,...

Le schéma ci-dessous montre l'étendue de l'effet de protection par rapport au vent dans le sillage d'un bâtiment isolé de 48m de long, 48m de haut et 12m de large.



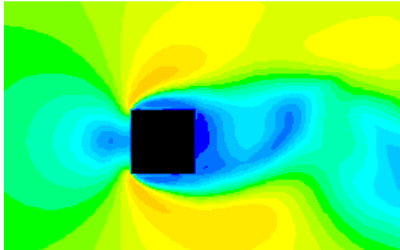
Même derrière des bâtiments très élevés, on retrouve une zone de protection par rapport au vent dans leur sillage. Le niveau de protection correspond généralement à un rapport U/U_0 inférieur ou égal à 0.5 sur une largeur égale à la largeur face au vent du bâtiment et une longueur égale à 3 à 4 fois la plus petite dimension entre la hauteur et la largeur face au vent du bâtiment. Mais la zone de recirculation de l'air s'étend bien au-delà.

Le flux de recirculation du sillage s'étend sur une région d'une longueur approximative $L = 10 R$ où $R = d^{0.67} D^{0.33}$ avec d = la dimension la plus petite entre la hauteur et la largeur de la face au vent du bâtiment et D = la dimension la plus grande entre la hauteur et la largeur de la face au vent du bâtiment. Quand $D > 8d$, alors il faut utiliser $D = 8d$. (Ashrae 2001).

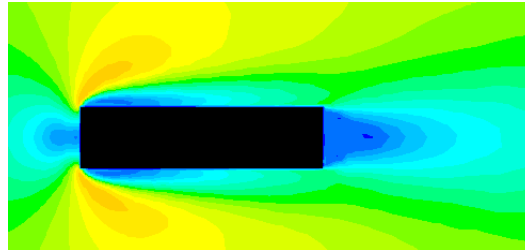
Il est important de souligner que la surface de cette zone de protection dépend en grande partie de la longueur de la façade au vent du bâtiment. Le schéma de gauche ci-dessous montre la zone de sillage générée par un bâtiment de plan carré de 12m de côté et de 48m de haut. La zone de sillage à l'arrière de cet édifice est nettement réduite par rapport au bâtiment de même hauteur mais dont la façade au vent mesure 48m de long.

Le schéma de droite montre la zone de protection à l'arrière d'un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large sous une incidence de 90° par rapport à sa longue façade. On voit qu'ici aussi la zone de protection par rapport au vent (surface bleue) est très fortement réduite.

Dans les deux schémas ci-dessous, l'échelle des vitesses du vent est identique à celle du premier schéma d'un bâtiment de 48m de long pour une orientation du vent de 0° par rapport à sa façade principale.



Bâtiment de 12m de côté.



Bâtiment de 48m de long orienté à 90°

Dans la simulation de gauche ci-dessus, on voit bien qu'un phénomène instationnaire s'impose. Il serait utile dans ce type de cas de faire une simulation temporelle pour analyser l'amplitude du mouvement instationnaire.

Pour profiter d'une large zone de protection à l'arrière d'un bâtiment, il est donc conseillé de tourner la longueur principale d'un bâtiment face au vent dominant. Nous vous renvoyons à la section sur l'effet de cisaillement pour observer l'évolution détaillée de la forme de cette zone protégée en fonction de l'angle d'incidence du vent par rapport à un bâtiment isolé. Il y a donc un choix architectural à faire entre une orientation du bâtiment qui réduit l'effet de cisaillement et la zone de sillage ou une orientation qui offre une large surface protégée du vent dans son sillage mais un effet de cisaillement accru. Les types d'espaces publics prévus autour du bâtiment devraient être pris en compte dans ce choix stratégique.

Conseil pratique:

Pour profiter d'une large zone de protection à l'arrière d'un bâtiment, il est conseillé de présenter sa plus longue façade perpendiculairement au vent dominant (= incidence du vent de 0°).

[A retenir...](#)

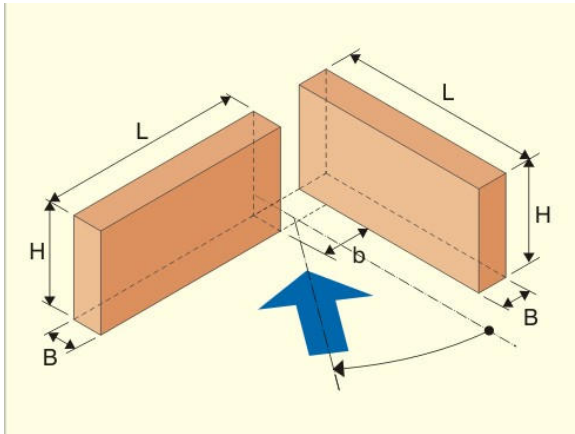
Dans le sillage d'un bâtiment isolé se développe une large zone de protection par rapport au vent, idéale pour y développer des zones de détente confortables pour les piétons.

Le niveau de protection correspond généralement à un rapport U/U_0 inférieur ou égal à 0.5 sur une **largeur égale à la largeur face au vent du bâtiment** et une **longueur égale à 3 à 4 fois la plus petite dimension entre la hauteur et la largeur face au vent du bâtiment.**

4.4.7 L'effet Venturi

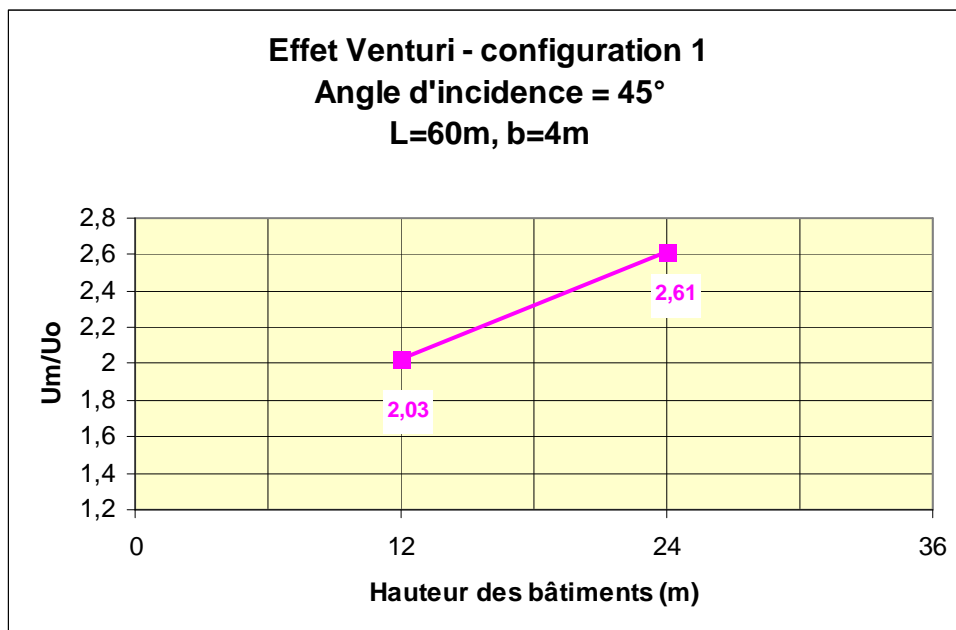
L'effet Venturi apparaît quand deux bâtiments sont placés de manière à créer un entonnoir par rapport au vent.

Notre **configuration de base** correspond à un entonnoir créé à partir de deux bâtiments perpendiculaires et alignés.



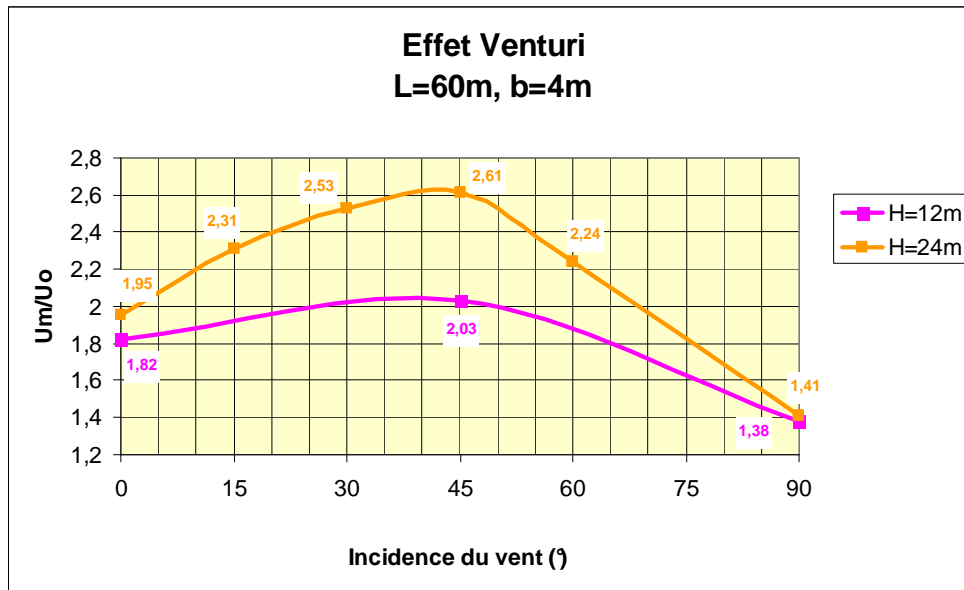
Effet Venturi – configuration 1

Augmenter la hauteur des bâtiments accroît fortement l'effet Venturi dans le passage entre bâtiments. Le graphe ci-dessous représente l'effet Venturi ($\theta=45^\circ$) pour des bâtiments de 60m de longueur et 12m de largeur avec un passage entre bâtiment de 4m, en fonction de la hauteur des bâtiments ($H=12\text{m}$ et $H=24\text{m}$).



Pour rappel, l'effet de coin au pied d'un bâtiment isolé de 24m de haut donne un rapport U/U_0 de 1.68 et l'effet de double coin entre deux bâtiments de 24m de haut donne un rapport U/U_0 de 2. Ainsi, l'effet Venturi multiplie la valeur du rapport U/U_0 au niveau piéton d'un rapport égal à 1.55 en comparaison d'un bâtiment isolé et d'un rapport égal à 1.3 en comparaison d'un effet de double coin pour une même hauteur de bâtiments.

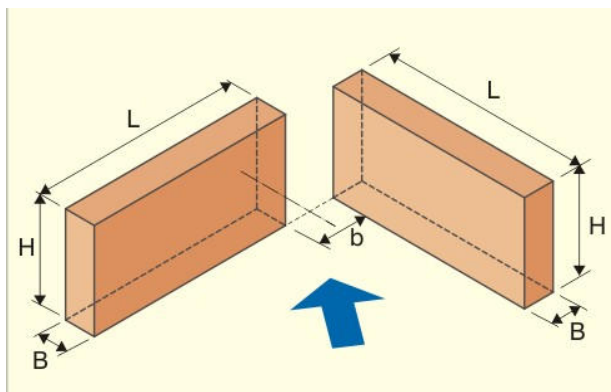
Le graphe ci-dessous permet d'étudier l'influence de l'incidence du vent couplée à la hauteur des bâtiments pour l'effet Venturi. Les bâtiments simulés ont une hauteur de 12 et 24m, une longueur de 60m et une largeur de 12m. Le passage entre bâtiments a 4m de large.



Ce graphe permet de conclure que l'effet Venturi est maximal pour une incidence du vent à 45° , c'est-à-dire pour un vent parallèle à la bissectrice de l'entonnoir. D'autre part, l'effet Venturi augmente avec la hauteur des bâtiments pour toutes les orientations de vent mais l'écart est maximal pour une orientation du vent de 45° .

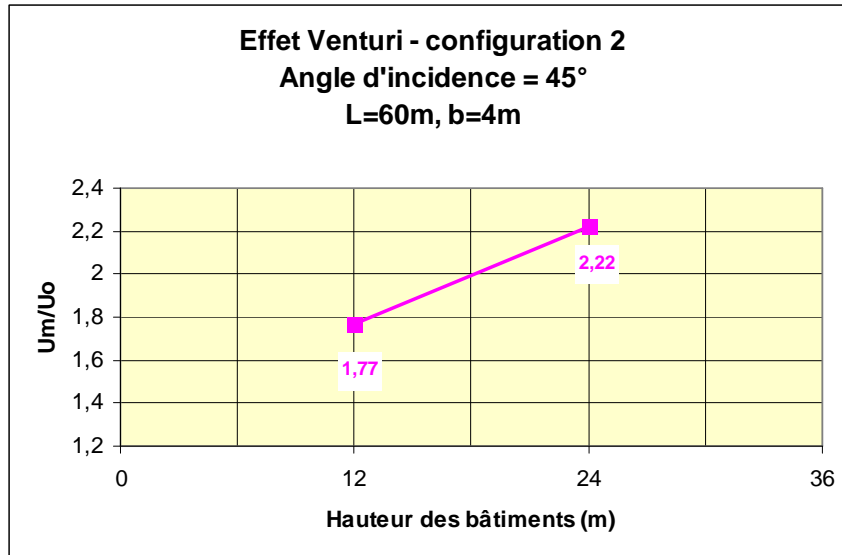
D'après Gandemer, l'effet Venturi n'apparaît que lorsque la somme des longueurs des bras du Venturi est supérieure ou égale à 100m, pour un passage dont la projection de la largeur orthogonalement à la direction du vent est comprise entre la moitié de la hauteur moyenne des bras du collecteur et 4 fois leur hauteur. A l'intérieur de cet intervalle, la largeur du passage modifie peu l'intensité de l'effet Venturi. (Gandemer 1975)

Une variante de cette configuration de base a été testée pour l'effet Venturi : il s'agit de bâtiments perpendiculaires mais décalés l'un par rapport à l'autre. Cette situation présente comme caractéristique essentielle de créer un effet Venturi sans qu'il y ait de couloir qui prolonge l'entonnoir.



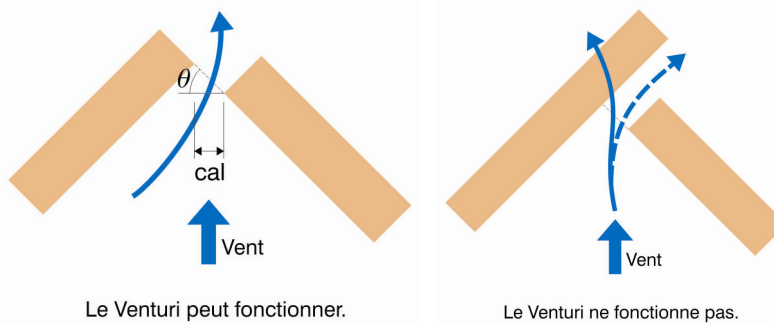
Effet Venturi – configuration sans couloir

Pour cette seconde configuration, le graphe ci-dessous montre l'effet de la hauteur des bâtiments sur l'effet Venturi au niveau le plus serré de l'entonnoir. Le graphe ci-dessous représente l'effet Venturi ($\theta=45^\circ$) pour des bâtiments de 60m de longueur et 12m de largeur avec un passage entre bâtiment de 4m, en fonction de la hauteur des bâtiments ($H=12\text{m}$ et $H=24\text{m}$).



Ainsi, cette seconde configuration est légèrement moins critique que la précédente. Décaler les bâtiments de manière à ce que le Venturi ne soit pas prolongé par un couloir réduit l'intensité des survitesses. La suppression d'un couloir de 12m de long, réduit l'effet Venturi d'environ 15%.

Une configuration semble encore meilleure d'après Gandemer et Barnaud : si un des bras dépasse largement derrière l'ouverture, le Venturi ne fonctionne pas parce que la largeur effective est insuffisante. (Gandemer & Barnaud 1975)



(Gandemer & Barnaud 1975)

D'après Gandemer, un Venturi noyé dans un environnement amont ou aval de même hauteur moyenne que celle des éléments constituant le Venturi, ne se comporte plus comme un collecteur. Il n'y a pas dans ce cas d'effet de survitesses au niveau de l'entonnoir. De même, si le Venturi débouche sur une maille fermée de superficie plus petite ou voisine de celle de l'anomalie et de hauteur suffisante par rapport aux bâtiments formant l'entonnoir, l'effet Venturi disparaît. Tant que les constructions amont et aval sont d'une hauteur supérieure ou égale à la moitié de la hauteur moyenne des bâtiments constituant le Venturi, la zone reste confortable. (Gandemer 1975)

Enfin, signalons que les Venturi à formes courbes conduisent à de véritables tuyères aérodynamiques. L'effet de survitesses y est violemment amplifié. (Gandemer 1975)

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet Venturi, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments** formant l'angle ouvert au vent.
- **diminuer la longueur des bras du Venturi** pour que la somme de leur longueur totale reste inférieure à 100m. Une possibilité est de créer des bras poreux en introduisant des séparations d'une longueur supérieure à la moyenne des bras du Venturi.
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit parallèle à un des bras du collecteur. Eviter absolument l'orientation où la bissectrice de l'entonnoir correspond aux vents dominants.
- **densifier la zone** en amont ou en aval du collecteur par des bâtiments d'une hauteur au moins égale à la moitié de la hauteur du Venturi.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) dans l'entonnoir pour ralentir le vent.
- **décaler les bâtiments** formant l'angle de manière à ce qu'un des bras dépasse largement derrière le Venturi.

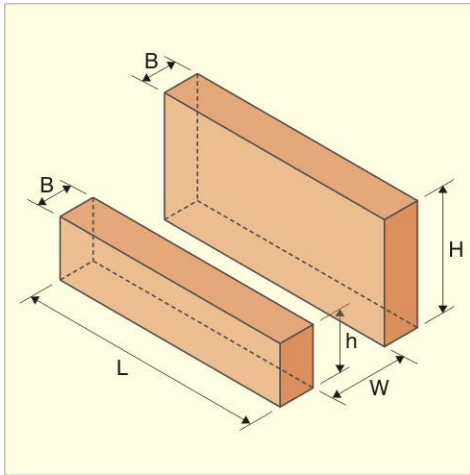
A retenir...

L'effet Venturi est d'autant plus fort que la hauteur des bâtiments augmente et que l'angle d'incidence du vent se rapproche de la bissectrice de l'entonnoir.

La prolongation de l'entonnoir par un couloir augmente l'intensité de l'effet Venturi alors qu'un prolongement important d'un des bras au-delà de l'ouverture supprime l'effet critique.

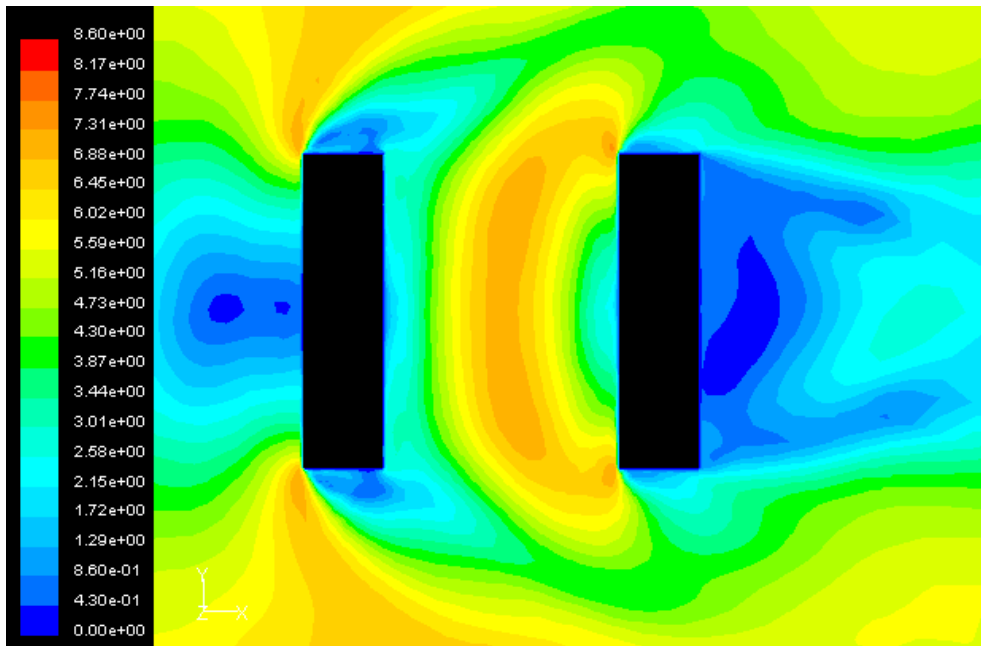
4.4.8 L'effet Wise

Analysons maintenant l'**effet Wise**. Il s'agit d'un rouleau tourbillonnaire qui apparaît devant un bâtiment élevé lorsque celui-ci est précédé d'un petit bâtiment. Il s'agit donc de la même structure architecturale que celle étudiée sous la dénomination de la configuration 2 de l'effet de coin. Mais ici, c'est la vitesse de l'air au centre entre les deux bâtiments qui est étudiée.



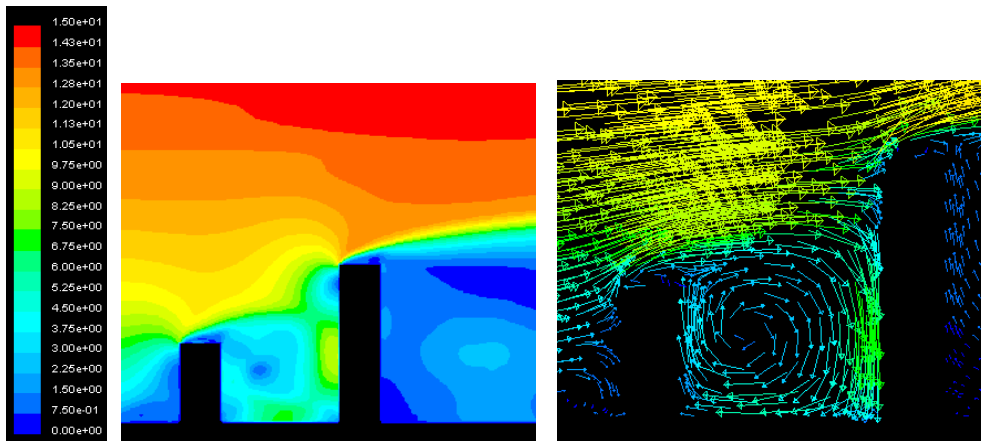
Configuration de l'effet Wise.

Pour un bâtiment de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, suivi à une distance de 36m d'un bâtiment élevé de 48m de haut, on voit graphiquement la répartition des survitesses en plan à 1.5m du sol. Une zone d'accélération de l'air au niveau piéton est bien visible entre les deux bâtiments : il s'agit de l'effet Wise.



Plan des survitesses à 1.5 m de haut.

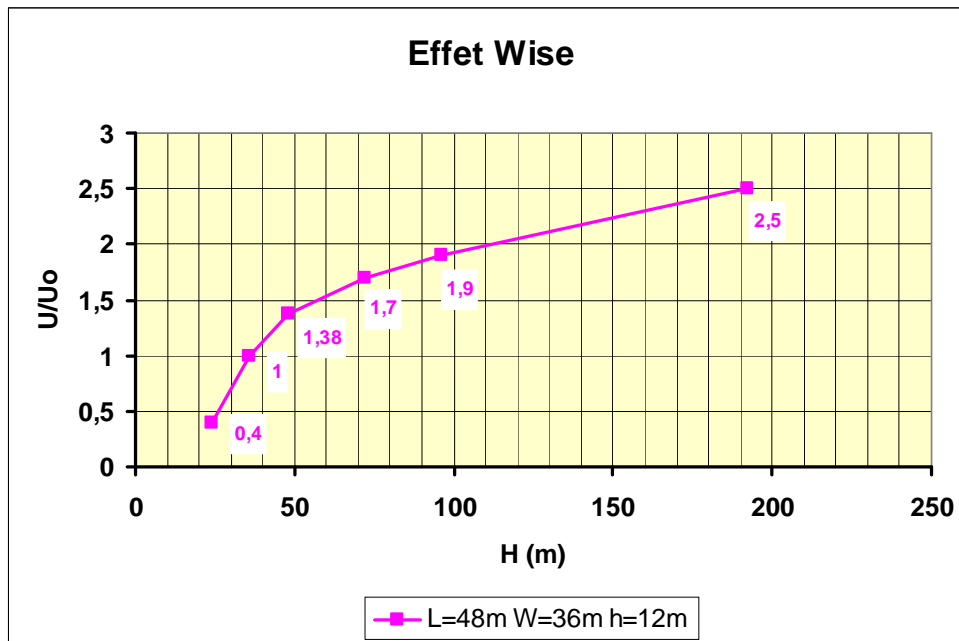
Les graphes ci-dessous donnent la répartition des vitesses de l'air dans le cas d'un effet Wise pour une coupe au centre des deux bâtiments. Le graphe de gauche montre l'écoulement général de l'air autour du groupe de bâtiments en fonction de courbes iso-vitesses. A droite, le graphe donne les vecteurs de vitesses de l'air dans l'espace compris entre les deux bâtiments, c'est-à-dire la zone soumise à l'effet Wise. Attention les échelles du plan ci-dessus et des coupes ci-dessous sont différentes. En revanche, les échelles utilisées pour les deux coupes sont identiques.



Courbes iso-vitesses et vecteurs de la vitesse de l'air au niveau de l'effet Wise.

Ce graphique met en évidence le fait que cet effet tourbillonnaire est spécialement gênant pour les piétons en raison de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique. Dans le cas ci-dessus, le rapport des survitesses au niveau piéton entre les deux bâtiments vaut $U/U_0=1.4$.

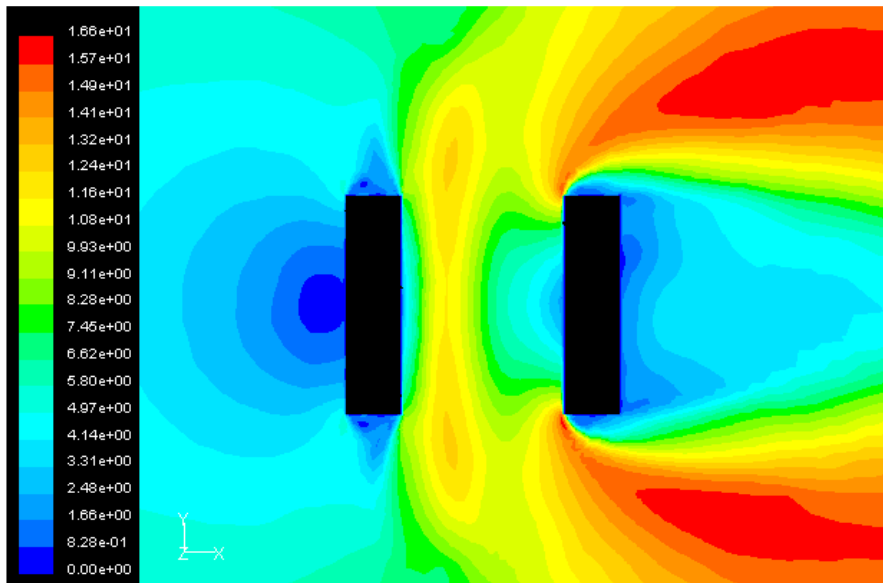
Pour un bâtiment élevé de 48m de long, précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut avec une inter-distance entre ces deux bâtiments de 36m, on obtient les valeurs suivantes en fonction de la hauteur du grand bâtiment. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 maximal simulé entre les deux bâtiments pour une hauteur du bâtiment élevé H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m et 192m.



L'effet Wise n'apparaît réellement que pour une hauteur de bâtiment de 40m de haut. Il n'empêche que cet effet peut être réellement critique pour les bâtiments très élevés. Le rapport U/U_0 généré entre les bâtiments par l'effet Wise croît fortement quand la hauteur du bâtiment augmente.

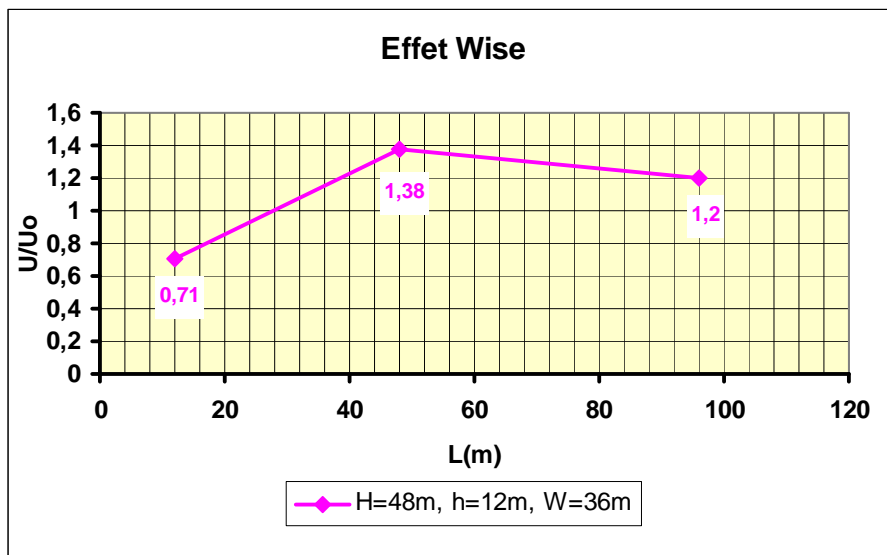
Pour les bâtiments très élevés, l'effet Wise s'étend largement de part et d'autre du groupe de bâtiments. Ainsi, le résultat de simulation ci-dessous montre l'étalement de l'effet Wise sur une longueur environ égale à $2L$ c'est-à-dire deux fois la

longueur des bâtiments pour le cas d'un petit bâtiment de 12m de haut précédant un un bâtiment de 192m de haut avec une interdistance de 36m. Ce graphe montre aussi que la zone où l'effet Wise est le plus prononcé se trouve aux extrémités de la zone d'inconfort, près des bords des bâtiments.



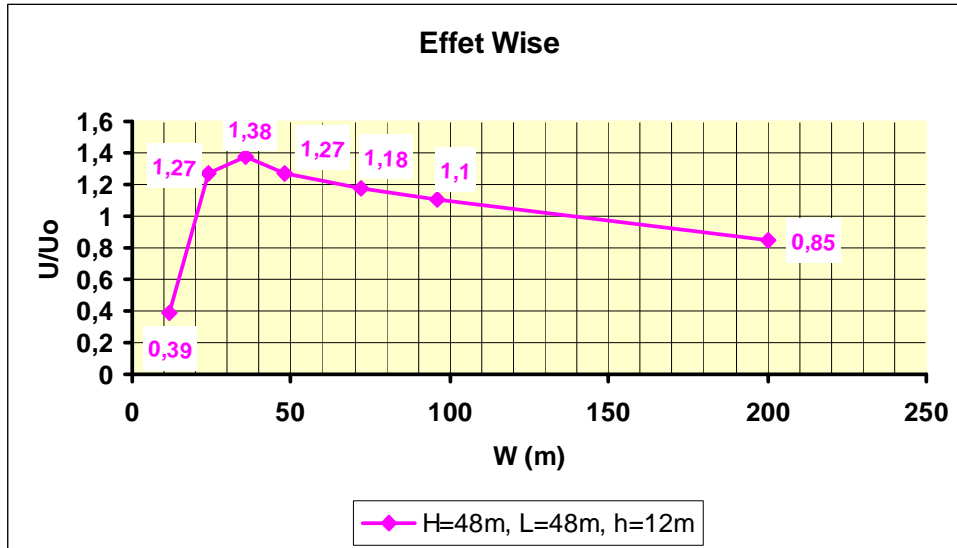
Plan des survitesses à 1.5 m de haut.

Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur du groupe de bâtiments sur l'effet Wise entre les deux bâtiments. La hauteur du bâtiment élevé est cette fois fixée à 48m, celle du petit bâtiment à 12m, pour une longueur identique pour les deux bâtiments de respectivement 12m, 48m et 96m.



Ce graphe montre que pour l'effet Wise, la réduction de la longueur du bâtiment diminue fortement le rapport U/U_0 . L'effet Wise est donc un phénomène qui n'est critique que pour de très hauts bâtiments ($H > 40m$) dont la longueur est également importante. En effet, un bâtiment plus long obstrue davantage l'écoulement du vent et une plus grande part de l'air est donc renvoyée vers le sol. Cependant, le rapport U/U_0 décroît lentement lorsque la longueur des bâtiments s'accroît au-delà de la hauteur du grand bâtiment ($L/H \geq 1$).

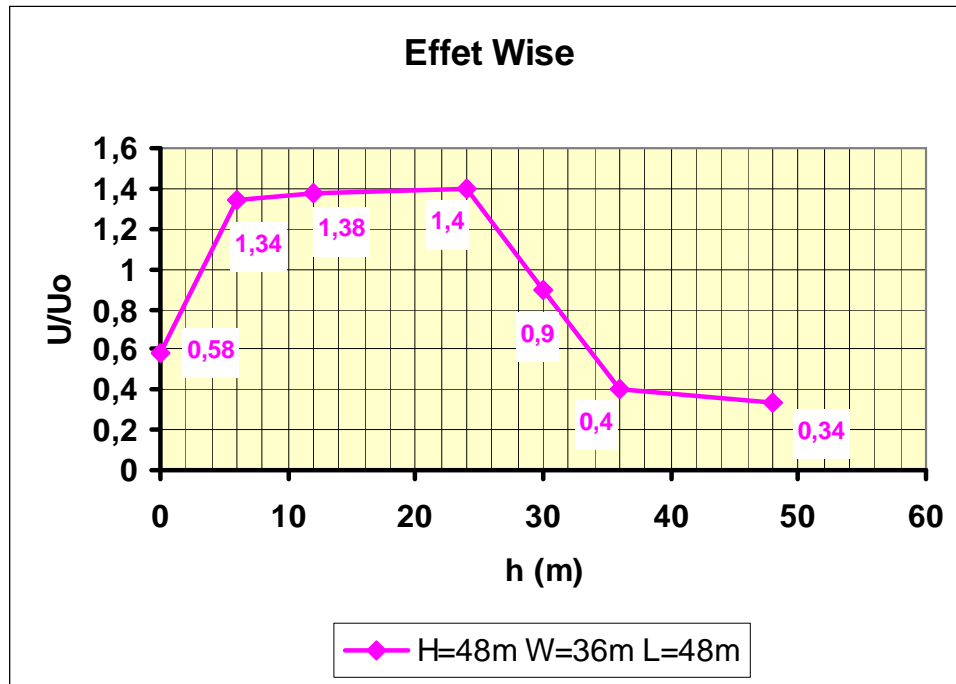
Vu que l'effet Wise se définit par la présence d'un petit bâtiment placé devant un bâtiment élevé, il est intéressant d'étudier l'influence de la distance entre ces deux édifices sur l'inconfort généré au niveau piéton. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 généré par l'effet Wise pour différentes inter-distances mais pour une hauteur et une longueur du bâtiment élevé de 48m et une hauteur du petit bâtiment de 12m.



Pour l'inter-distance entre le petit et le grand bâtiment, on observe les phénomènes suivants :

- Lorsque W est faible, le tourbillon n'arrive pas à pénétrer profondément dans l'espace entre les bâtiments et le rapport U/U_0 est faible.
- Lorsque W augmente, le rapport U/U_0 augmente, atteint un maximum à une distance critique puis diminue. Pour $H=48\text{m}$ et $h=12\text{m}$, l'effet critique correspond à une inter-distance W comprise entre $W=0,4H$ et $W=2H$. La distance la plus critique correspond à une longueur de 36m entre les deux bâtiments, c'est-à-dire une distance égale aux trois quarts de la hauteur du bâtiment élevé : $W=3H/4$.
- Au-delà de $W=2H$, il n'y a plus vraiment d'effet critique. Pour un W supérieur à 200m, le rapport U/U_0 devant le grand bâtiment se rapproche de l'effet tourbillonnaire généré au pied d'un bâtiment élevé isolé. On voit que cet effet est protecteur pour un bâtiment de 48m de haut.

Enfin, pour une distance entre les deux bâtiments fixée, l'effet Wise dépend du rapport de hauteur entre le petit et le grand bâtiment. Le graphe ci-dessous permet d'analyser l'influence de la hauteur du petit bâtiment dans ce processus aérodynamique, pour une distance de 36m entre les deux bâtiments, distance qui se situe dans la zone critique générant réellement l'effet Wise. La hauteur et la largeur du grand bâtiment sont fixées à 48m.



L'effet Wise génère un rapport U/U_0 qui varie en fonction de la hauteur du petit bâtiment amont. Cet effet génère des survitesses au niveau piéton pour une hauteur du petit bâtiment comprise dans l'intervalle $h = [0.1 H ; 0.6 H]$. Les survitesses maximales sont atteintes pour une hauteur du petit bâtiment égale à la moitié de la hauteur du bâtiment élevé : $h = H/2$. Au-dessus de cette hauteur, le petit bâtiment commence à créer un effet de masque qui diminue progressivement l'effet Wise et annule son effet lorsque le petit bâtiment atteint une hauteur égale aux trois-quarts de la hauteur du plus grand bâtiment, générant alors une zone très confortable pour les piétons.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet Wise, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment élevé**
- **diminuer la longueur du bâtiment élevé**
- **augmenter la taille du petit bâtiment** de telle sorte que **$h \geq 0.6 H$**
- **augmenter l'inter-distance entre les deux bâtiments** de telle sorte que **$W \geq 2 H$**
- **densifier l'environnement proche**
- **protéger l'espace entre les bâtiments** par un auvent, de la végétation,...
- **introduire une porosité au-dessus du niveau piéton** (c'est-à-dire que l'air doit pouvoir passer à travers le grand bâtiment au-dessus du niveau piéton).

A retenir...

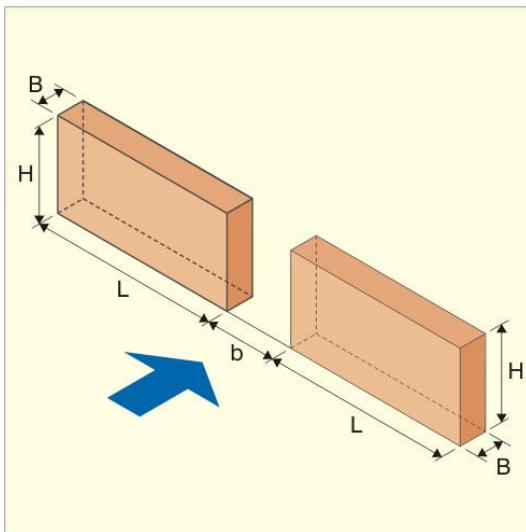
L'effet Wise est un phénomène qui n'est critique que pour de très hauts bâtiments ($H > 40\text{m}$) dont la longueur est également importante. L'effet Wise augmente fortement avec l'accroissement de la hauteur du second bâtiment.

Le rapport de hauteur entre les deux bâtiments et leur inter-distance ont un effet majeur sur la formation de l'effet Wise. L'effet Wise n'apparaît que pour une inter-distance entre les deux bâtiments comprise dans l'intervalle $W = [0.4 H ; 2 H]$ et pour une hauteur du petit bâtiment comprise dans l'intervalle $h = [0.1 H ; 0.6 H]$. L'inter-distance la plus critique vaut $W = 3/4 H$. La hauteur du petit bâtiment la plus critique vaut $h = H/2$.

Pour les bâtiments très élevés, l'effet Wise s'étend largement de part et d'autre du groupe de bâtiments, sur une longueur environ égale à $2L$ où L est la longueur du bâtiment élevé.

4.4.9 L'effet de double coin

La **configuration** de l'effet de double coin ou passage entre deux immeubles est créée à partir de deux bâtiments placés longitudinalement côte à côte et séparés par un passage.



Double coin

Une comparaison d'un même cas pour un profil de vent de campagne, un profil de vent suburbain et un profil de vent urbain a été réalisée pour l'effet de double coin (configuration 2) pour des bâtiments de 60m de long, 18m de haut et un passage de 4m de large. Les profils de vent utilisés suivent les formules suivantes.

Vent de campagne :

$$0.52 Z^{0.2} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 7.28\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Vent suburbain :

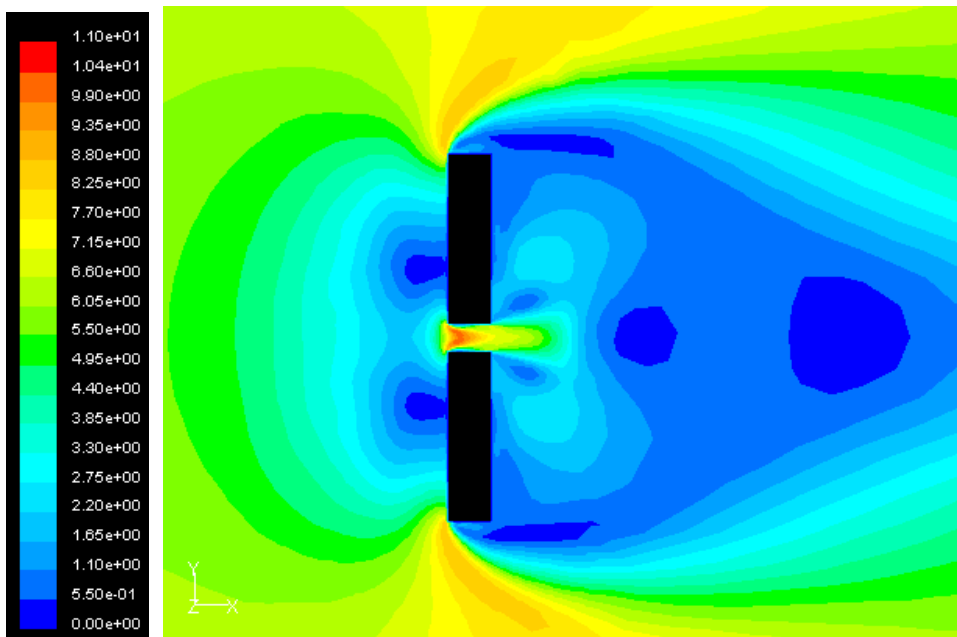
$$0.4 Z^{0.235} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 5.68\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Vent urbain :

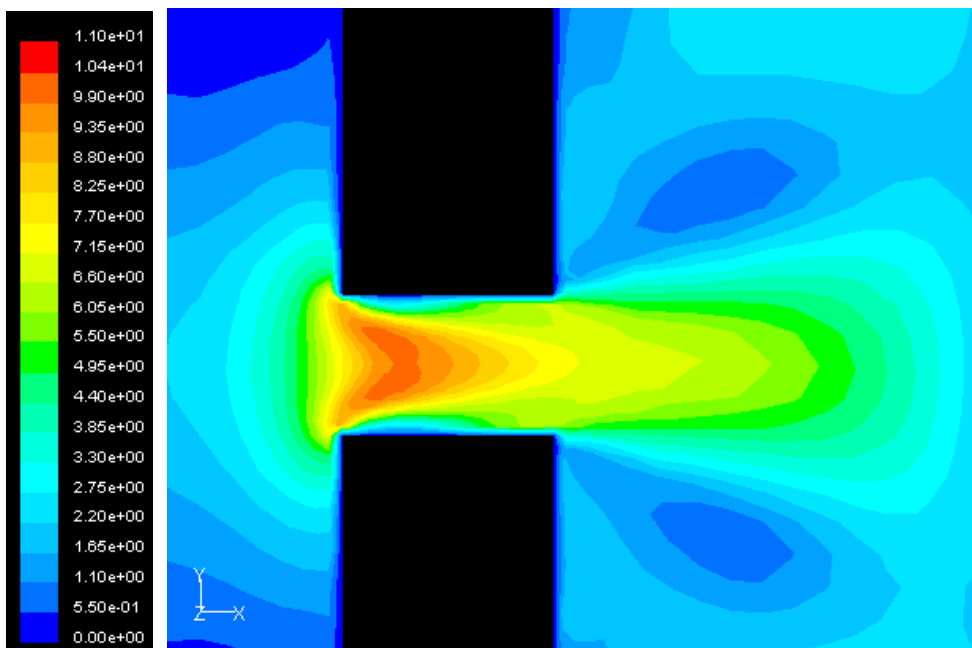
$$0.35 Z^{0.25} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 5\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Ces trois profils de vent donnent un résultat semblable : le rapport U/U_0 est identique pour le vent urbain et le vent suburbain et vaut 1.84. Pour le vent de campagne, le rapport U/U_0 maximal vaut 1.87. Dans ce cas, la valeur donnée par la simulation en vent urbain est valable pour étudier un cas suburbain et donne une première approximation pour un groupe de bâtiments en pleine campagne....

Le résultat de simulation présenté ci-dessous montre l'effet de double coin généré par un passage entre deux immeubles de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, séparés par un couloir de 8m de large. La zone entre les deux bâtiments est très critique du point de vue de l'inconfort au vent. De plus, la zone d'inconfort se prolonge à l'arrière des bâtiments par un jet d'air venant du passage entre immeuble sur une distance environ égale à la largeur des bâtiments formant le passage.

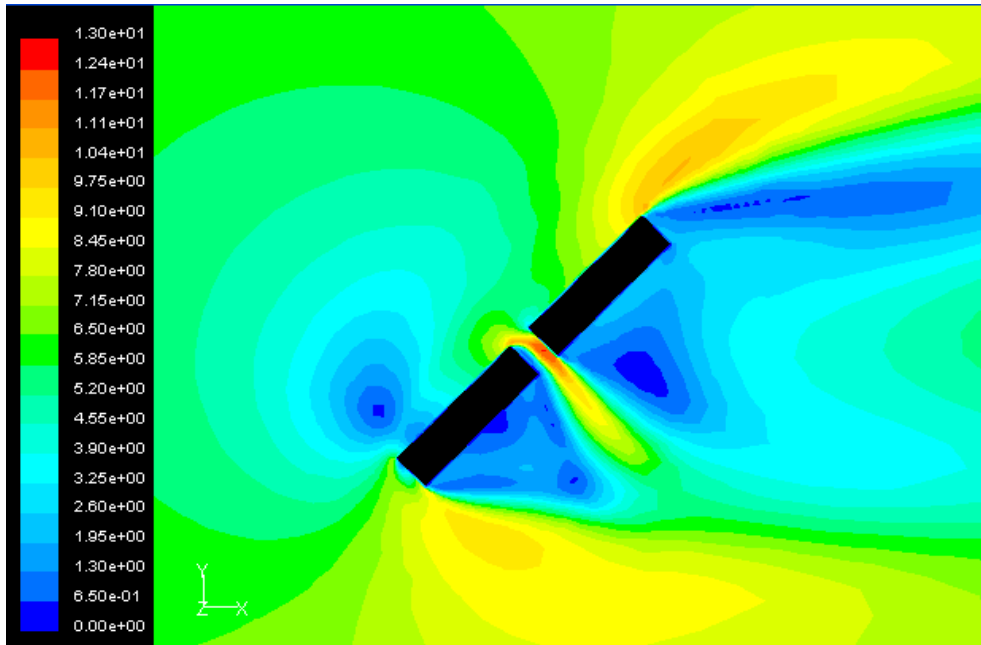


Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour un effet de double coin



Agrandissement : survitesses au niveau du passage entre les bâtiments

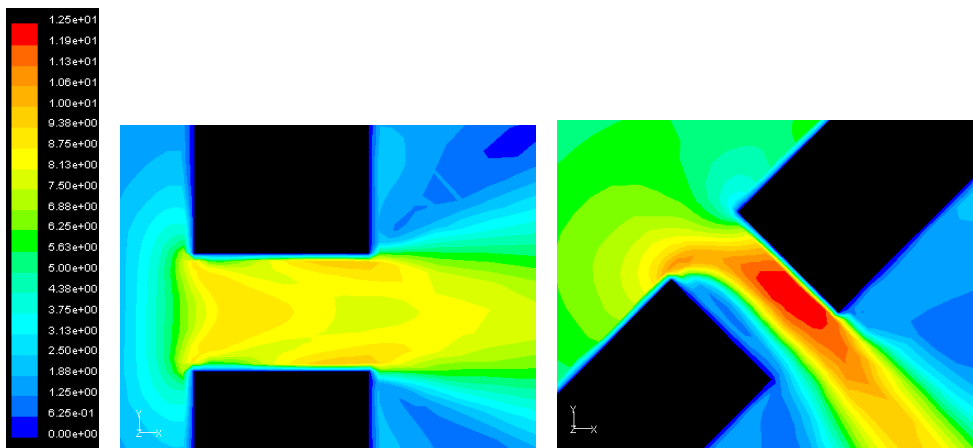
La zone critique de l'effet de double coin est nettement plus longue pour une orientation du vent à 45° par rapport à l'axe entre les bâtiments. Le graphe ci-dessous montre la répartition des vitesses de l'air autour d'un ensemble de bâtiments de 48m de long et de haut, espacés de 8m l'un par rapport à l'autre. On voit que la zone de jet se prolonge dans ce cas sur une longueur égale à trois fois la largeur des bâtiments formant le passage.



Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour $\alpha=45^\circ$, $H=48m$, $L=48m$, $B=12m$, $b=8m$

Pour l'orientation du vent parallèlement à l'axe du passage, la distribution du rapport des vitesses se caractérise par un maximum à l'intérieur du passage à quelques mètres de son entrée. La position de la survitesse maximale varie peu avec la hauteur du bâtiment et la largeur du passage, tant que l'orientation du vent est perpendiculaire à la façade. En revanche, la position des survitesses maximales est totalement décentrée lorsque l'orientation du vent devient oblique à la façade.

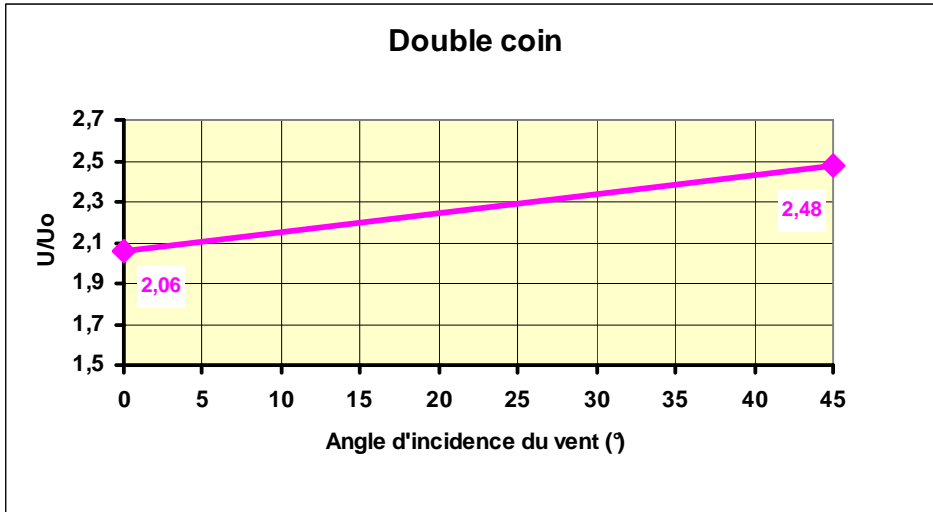
Les graphes ci-dessous montrent les survitesses dans un passage de 8m de large pour une orientation du vent de 0° (à gauche) et de 45° (à droite) par rapport à des bâtiments de 48m de long, 48m de haut et 12m de large.



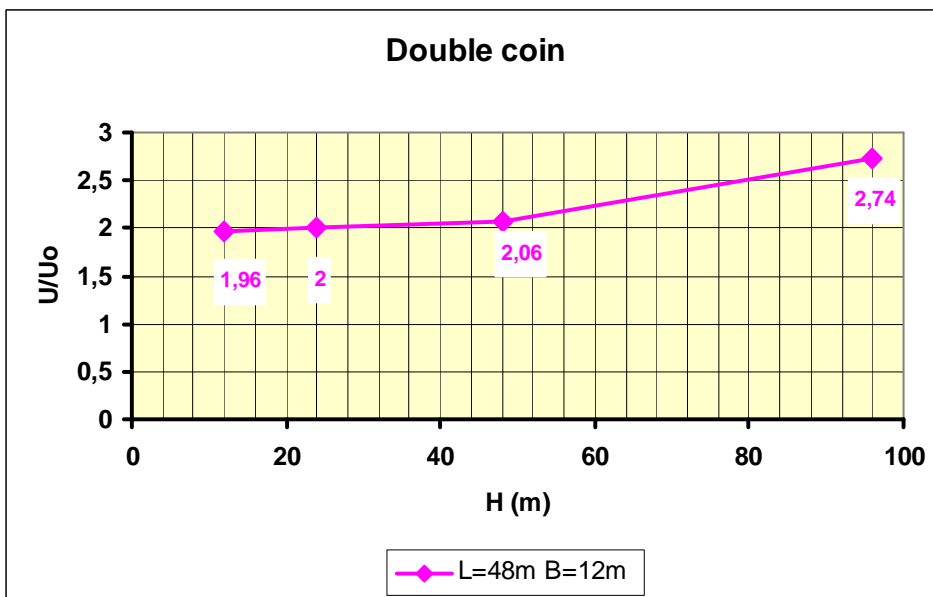
Comparaison des survitesses en plan pour une orientation du vent de 0° et 45° par rapport au passage entre les bâtiments

On voit que les survitesses sont symétriques par rapport à l'axe central du passage pour un vent parallèle au passage alors que les vitesses maximales de l'air longent la paroi du passage exposée au vent dans le cas d'un vent orienté à 45° par rapport au passage entre immeubles. Les deux graphes sont présentés selon la même échelle de vitesses de l'air. On voit déjà que l'orientation à 45° génère un inconfort encore plus élevé que l'orientation du vent parallèle au passage.

Le schéma ci-dessous permet de comparer l'inconfort au vent généré par un effet de double coin pour un vent perpendiculaire aux façades principales et pour une incidence du vent de 45°. Une orientation du vent oblique augmente l'effet de double coin d'environ 20% par rapport à un vent parallèle au passage.

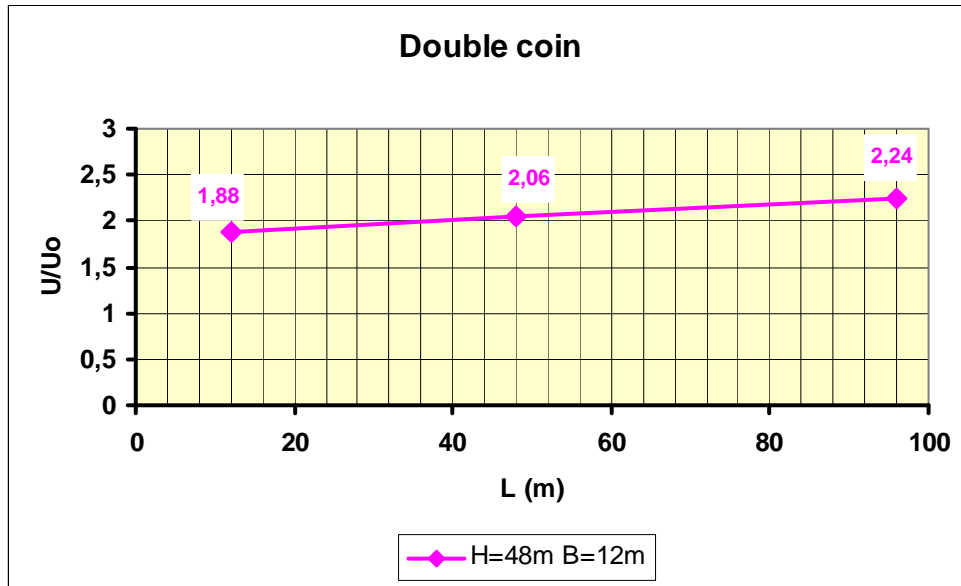


Le schéma ci-dessous présente la variation de l'effet de double coin avec l'accroissement de la hauteur des deux bâtiments, pour une longueur de 48m, une largeur de 12m et un espacement entre les bâtiments de 8m. L'orientation du vent est parallèle au passage entre immeubles : $\theta=0^\circ$.



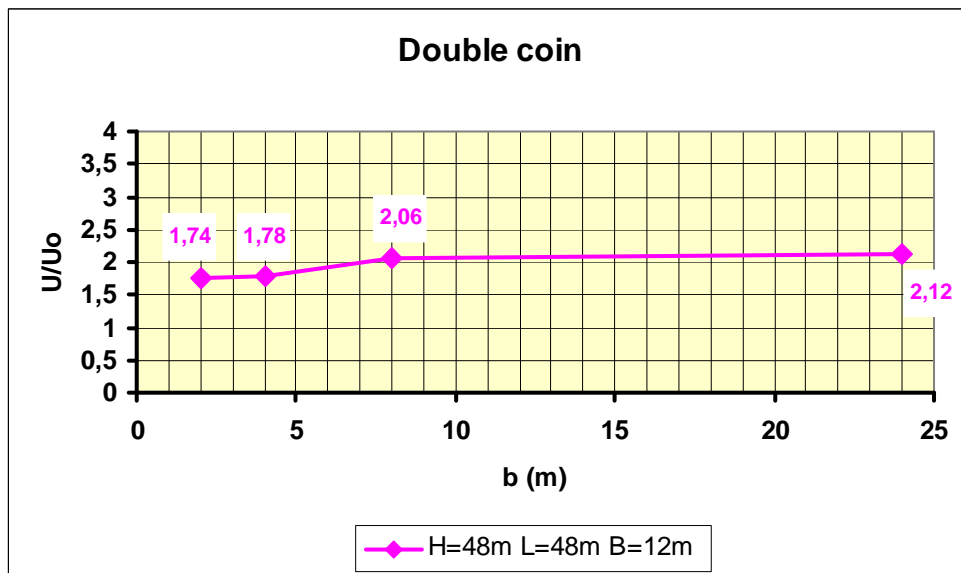
On voit que l'effet de double coin augmente avec l'accroissement de la hauteur des deux bâtiments.

Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut mais de longueur variable, placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage de 8m.



Ainsi, l'effet de double coin s'accroît avec l'augmentation de la longueur des bâtiments.

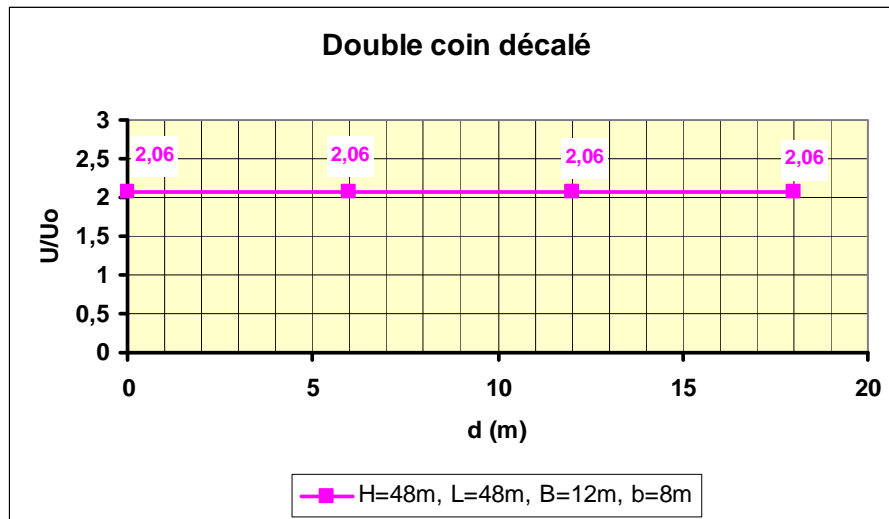
Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut et de longs, placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage dont l'interdistance varie.



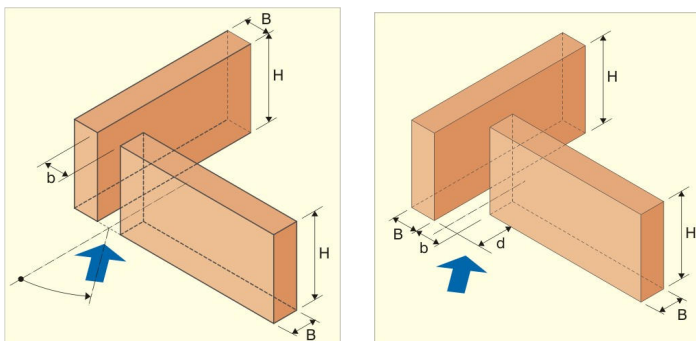
Ce graphe montre clairement que l'effet de double coin n'apparaît que pour une largeur du passage supérieure à 6m car en-dessous de cette longueur les survitesses mesurées à l'intérieur du passage sont inférieures à celles générées par un effet de coin classique. En effet, pour un bâtiment simple de 48m de haut, 48m de long et 12m de large, le rapport U/U_0 caractéristique de l'effet de coin vaut 1.94. En revanche, la largeur du passage a peu d'influence sur l'intensité de l'effet de coin, un fois que celui-ci est établi.

Cette configuration de l'effet de double coin généré par deux bâtiments situés parallèlement l'un à l'autre doit encore être analysée en fonction du décalage d'un bâtiment par rapport à l'autre le long de leurs largeurs respectives. Ainsi, pour une incidence du vent perpendiculaire aux façades, le paramètre d représente l'espace qui sépare les plans des deux façades au vent des bâtiments décalés. La configuration alignée présentée ci-dessus correspond donc à la valeur $d=0$.

Le graphe ci-dessous donne la survitesse maximale due à l'effet de double coin pour des bâtiments de 48m de long, 48m de haut et 12m de large, séparés par une largeur (b) de 8m et décalés d'une distance (d) de 0, 6, 12 et 18m.



Ce schéma montre que l'effet de décalage d'une longueur inférieure ou égale à deux fois la largeur du passage n'a aucun impact sur l'effet de double coin. C'est donc l'espace entre les bâtiments dans le sens de la longueur des façades qui prime sur la position en avant ou en arrière du bâtiment lorsqu'on évalue son effet aérodynamique. Ainsi, les deux configurations ci-dessous donnent par exemple le même inconfort au niveau du passage entre bâtiments.



Wiren a quantifié l'effet d'un auvent protecteur à l'intérieur du passage sur l'effet de double coin au niveau piéton. Un toit à double pente d'inclinaison $2/3$ couvre la totalité du passage entre bâtiments à une hauteur de 4m. L'ajout de ce double toit apporte une réduction des survitesses de 10 à 20% en fonction de l'orientation du vent et de la hauteur des bâtiments (Wiren 1975).

Des rangées d'arbres placées dans un passage entre bâtiments peuvent diminuer la vitesse du vent de 10 à 20% (Bottema 1993).

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de double coin, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments formant le passage.**
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport à la façade au vent percée par le passage entre immeubles. L'orientation idéale correspond à un vent perpendiculaire au passage pour piétons.
- **protéger le passage entre immeubles par un bâtiment**
- **protéger le passage entre immeubles par un auvent** qui divise le flux d'air à l'intérieur du passage et crée ainsi un couloir de déviation du vent au-dessus du passage pour piétons.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) à l'intérieur du passage.

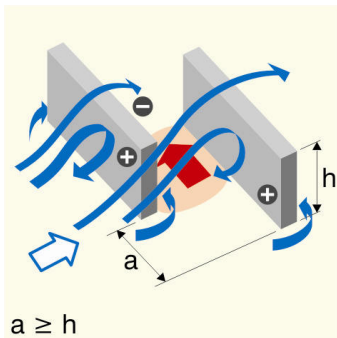
A retenir...

L'intensité de l'effet de double coin, augmente avec l'accroissement de la hauteur des bâtiments et plus légèrement avec l'augmentation de leur longueur.

Une largeur minimale du passage de 6m est nécessaire pour que l'effet de double coin soit supérieur à l'effet de coin d'un bâtiment isolé. En revanche, la largeur du passage a peu d'influence sur l'intensité de l'effet de coin, une fois que celui-ci est établi.

Des bâtiments décalés créent un effet de double coin identique par rapport à des bâtiments parallèles.

4.4.10 L'effet de bâtiments en quinconce (effet de liaison de zones de pression différente)



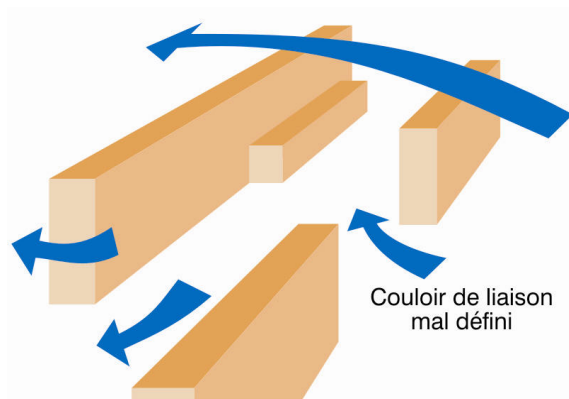
(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

Lorsque le vent rencontre un obstacle, il se forme une surpression à l'amont et une dépression à l'arrière de celui-ci. Si, au sein d'un plan masse, des bâtiments se trouvent placés en quinconce, sous une incidence du vent voisine de la normale, un phénomène d'écoulement entre les zones de pression différente (sens des pressions décroissantes) est formé. L'anomalie affecte tout le couloir de liaison.

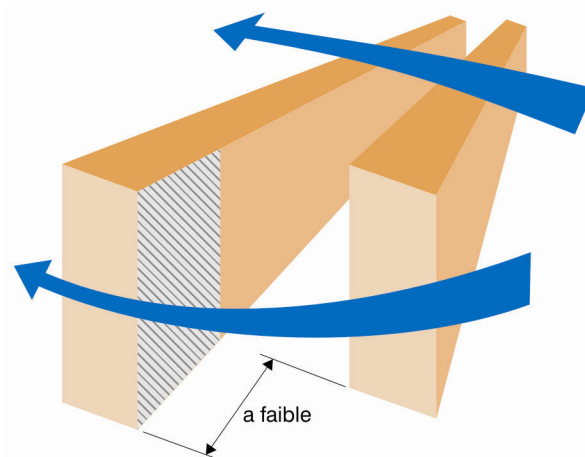
D'après Gandemer, pour que ce phénomène existe, il est nécessaire que (Gandemer 1975):

- le couloir de liaison soit bien défini, c'est dire qu'il soit continu et sans obstruction par rapport au vent



Pas d'effet critique du vent. (Gandemer 1975).

- la largeur du couloir de liaison reste inférieure ou égale à la hauteur des bâtiments en quinconce : $d \leq h$.
- la largeur des façades au vent non commune aux bâtiments soit supérieure ou égale à la hauteur des bâtiments en quinconce : $a \geq h$.

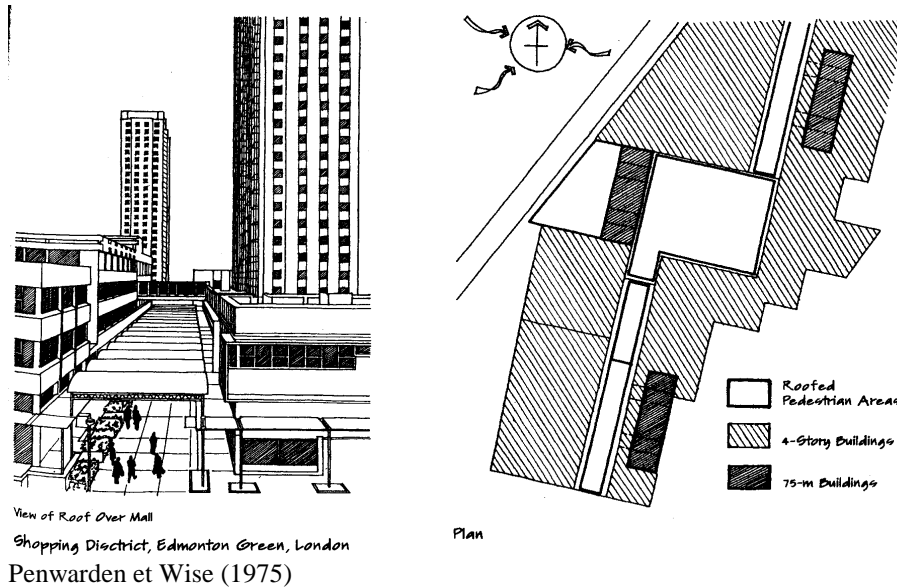


Pas d'effet critique du vent. (Gandemer 1975).

Pour une hauteur de bâtiments de 30m, des valeurs du rapport U/U_0 de 1.4 sont courante. Pour des bâtiments de 100m de haut, cet effet vaut 1.8 lorsque les tours sont espacées d'une largeur $d = L/4$ où L est la longueur au vent des bâtiments en

quinconce (Gandemer 1975). On voit donc que cet effet critique du vent est encore une fois très sensible à la hauteur des bâtiments.

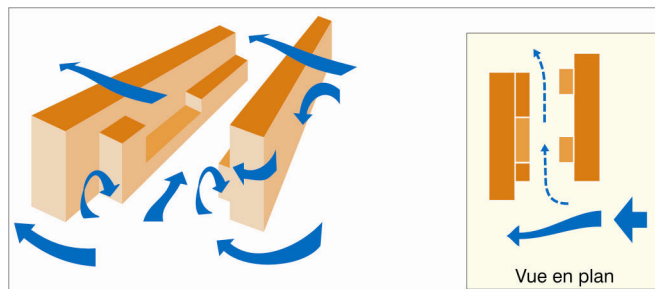
Le « shopping district at Edmonton Green » à Londres illustre bien cet effet de bâtiments en quinconce entre trois bâtiments élevés (immeubles à appartements de 75m de haut). Pour remédier à l'inconfort important au niveau des deux rues de liaisons ainsi que sur la place, des toits ont été placés au-dessus de tous les espaces publics extérieurs pour protéger les piétons.



Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet des bâtiments en quinconce, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments en quinconce.**
- **rapprocher les bâtiments en quinconce** pour que la largeur de la surface au vent non commune aux bâtiments soit inférieure à la hauteur des bâtiments en quinconce.
- **entraver l'écoulement dans le couloir de liaison à l'aide de décrochements**



(Gandemer 1975).

- **élargir le couloir de liaison** : sa largeur doit être supérieure à la hauteur moyenne des bâtiments en quinconce.
- **rendre le couloir de liaison poreux** en séparant les bâtiments qui le constituent

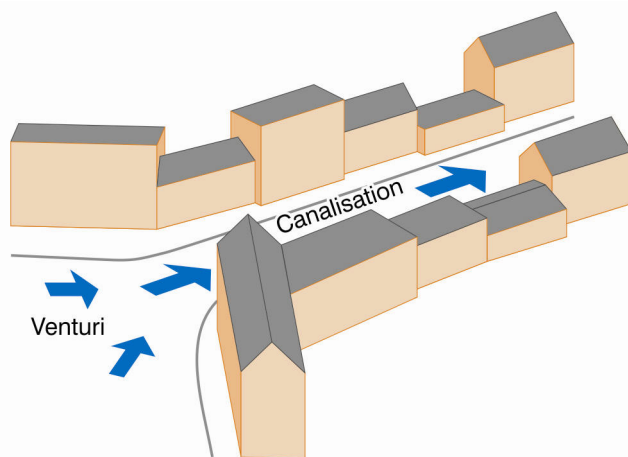
- **introduire des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) dans le couloir de liaison.

A retenir...

L'effet de bâtiments en quinconce s'accroît fortement avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments.

Son existence dépend de la définition et des dimensions du couloir de liaison entre les bâtiments en quinconce.

4.4.11 L'effet de canalisation linéaire



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature.

Une canalisation parallèle au vent dominant ne donne aucun caractère de protection mais n'introduit pas non plus des zones de survitesses importantes. Les vitesses peuvent toutefois être élevées si les conditions météorologiques ou l'implantation, par exemple en bord de mer, favorisent de fortes vitesses de vent. En revanche, une canalisation linéaire devient une cause de survitesses importantes si elle est associée à une autre anomalie aérodynamique (effet Venturi,...).

D'après Gandemer, pour que ce phénomène existe, il est nécessaire que (Gandemer 1975):

- le couloir soit constitué de parois peu poreuses (porosité totale $< 5\%$), dont l'espacement maximal est inférieur ou égal à l'épaisseur des bâtiments.
- la largeur du couloir soit relativement constante et reste inférieure à trois fois la hauteur moyenne des constructions qui le constitue.
- l'incidence du vent soit parallèle à l'axe de la canalisation.

La hauteur des bâtiments influence l'anomalie initiale mais ne joue pas directement sur le phénomène de canalisation. (Gandemer 1975)

L'intensité de l'effet critique dans la canalisation dépend évidemment de l'intensité de l'effet critique de départ qu'elle propage le long de son axe.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de canalisation, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

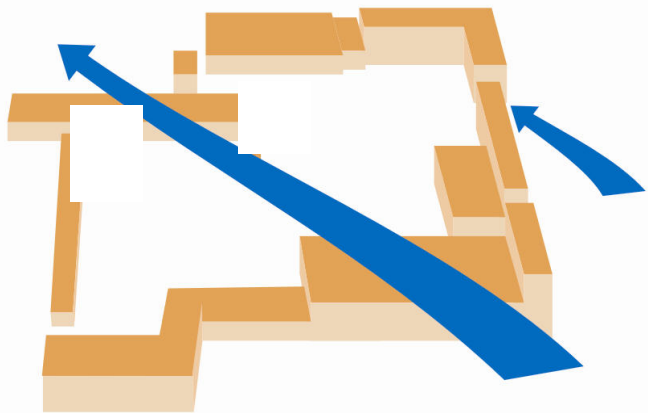
- **diminuer la longueur des canalisations**, surtout à proximité des bâtiments élevés.
- **élargir la canalisation** de manière à ce que sa largeur soit supérieure à trois fois la hauteur des bâtiments qui la constituent.
- **entraver l'écoulement dans la canalisation** à l'aide de décrochements, débords, terrasses,...
- **rendre la canalisation poreuse** (porosité >5%) en séparant les bâtiments qui la constituent
- **orienter les longues canalisations de manière perpendiculaire ou oblique par rapport aux vents dominants**, surtout à proximité des bâtiments élevés.
- **introduire des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) le long de la canalisation afin d'y freiner le vent.

A retenir...

Une canalisation linéaire n'est pas une situation critique en soit mais elle peut transmettre un inconfort au vent généré par un bâtiment élevé ou en groupe de bâtiments sur une grande longueur.

La largeur d'une canalisation continue et non obstruée et son orientation par rapport au vent sont les paramètres déterminants pour l'existence d'un tel effet critique.

4.4.12 L'effet de maille



(Gandemer 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

L'écoulement du vent et le confort des piétons à l'intérieur d'une maille dépendent des dimensions du volume bâti.

Les résultats ci-dessous ont été obtenus en test en tunnel à vent sur des maquettes formant des mailles fermées dont la longueur face au vent (L) et la profondeur (B) étaient variables mais la hauteur (H) constante et peu élevée. La vitesse du vent a été calculée sur 25 points répartis selon un maillage orthogonal dans l'espace étudié et à partir desquels une moyenne arithmétique a été déterminée pour chaque îlot. Ainsi les différentes géométries ont pu être comparées du point de vue de leur capacité de protection par rapport au vent. L'orientation du vent a été simulée pour $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ et 90° . (Smith & Wilson 1977).

Le tableau ci-dessous donne le rapport U/U_0 entre la moyenne des vitesses de vent expérimentées dans la maille au niveau piéton et la vitesse de référence sans bâtiment à la même hauteur, pour différents rapport B/H, L/H et les quatre orientations du vent (Smith & Wilson 1977).

B/H	L/H	U/U ₀			
		$\Theta = 0^\circ$	$\Theta = 30^\circ$	$\Theta = 60^\circ$	$\Theta = 90^\circ$
1	1	0.37			0.37
1	2	0.41	0.41	0.38	0.42
1	3	0.43	0.47	0.41	0.41
1	4	0.45	0.44	0.59	0.36
2	1	0.42	0.38	0.41	0.41
2	2	0.44	0.47	0.47	0.44
2	4	0.49	0.49	0.45	0.37
2	6	0.49	0.56	0.6	0.4
2	8	0.5	0.71	0.85	0.51
3	1	0.41	0.4	0.46	0.43
3	3	0.43	/	0.44	0.43
4	1	0.36	0.59	0.49	0.45
4	2	0.37	0.45	0.48	0.49
4	4	0.41	0.49	0.6	0.41
4	8	0.42	0.57	0.57	0.4
6	2	0.4	0.6	0.71	0.49
8	2	0.51	0.85	0.54	0.5
8	4	0.4	0.6	0.51	0.42
8	8	0.36	0.5		0.36
10	10	0.72	/		0.72

On voit bien que quelque soit les proportions de la maille (pour une longueur face au vent et une profondeur de la maille variant entre une fois et dix fois la hauteur de la maille) et quelque soit l'orientation du vent, une maille fermée génère une zone de grande protection par rapport aux vitesses de vent. Cette situation correspond évidemment aux intérieurs d'îlots, rencontrés dans la majorité des villes européennes.

D'après Gandemer, un ensemble de bâtiments en forme de boucle constitue une maille dès que (Gandemer 1975) :

- la hauteur moyenne h des bâtiments est supérieure à leur épaisseur.
- la longueur non construite de cette maille ne représente pas plus de 25% du périmètre de la maille.

D'une façon générale, toutes les mailles plus ou moins bien définies augmentent le confort si les dimensions transversales sont de l'ordre de 50 à 60m.

L'effet protecteur de la maille à l'intérieur de son périmètre est constaté pour des hauteurs de bâtiments inférieures ou égales à 25m et pour toutes les directions du vent dès que le rapport $S/(h^2) < 10$, où S est la superficie intérieure de la maille et h est la hauteur moyenne des bâtiments. (Gandemer 1975)

Pour des bâtiments de 30m de haut ou plus, l'influence de la position des ouvertures vis à vis de la direction du vent joue un rôle fondamental (Gandemer 1975) :

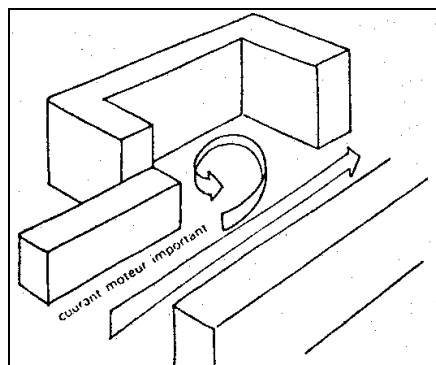
- lorsque la maille est fermée ou que l'ouverture est sous le vent de la maille, si $S/(h^2) < 30$, alors l'effet protecteur est important ($U/U_0 \approx 0.5$).
- lorsque la maille est ouverte au vent, si $S/(h^2) < 20$, il y a une zone de protection ($U/U_0 \approx 0.8$) sur 75 % de l'aire de la maille et une zone exposée au vent : l'embouchure, sur 25% de la maille.
- lorsque la maille présente son ouverture sous un angle de 45° à 90° par rapport au vent, si $S/(h^2) < 20$, les zones de confort sont variables mais globalement les vitesses de l'air sont plus faibles qu'en terrain découvert.

Il existe en plus deux types de mailles particulières (Gandemer 1975). La maille rectangulaire dont le côté compris entre les deux autres est de hauteur au moins égale à deux fois celle des autres cotés: le bâtiment élevé joue un rôle d'écran si l'incidence du vent est faible et si S' (surface du bâtiment élevé) vaut au moins 20% de S (la surface de la maille), alors l'effet protecteur est important ($U/U_0 \approx 0.5$).



(Gandemer & Barnaud 1975).

En revanche, la maille sifflet, une maille adjacente à un couloir de liaison ou une canalisation linéaire et telle que $S/(h^2) < 5$, donne des vitesses de vent supérieures à un terrain dégagé.



(Gandemer 1975).

Enfin, signalons que des mailles d'une superficie beaucoup plus importante ($S/h^2 \leq 300$) peuvent introduire un effet de protection intérieure si elles sont

intégrées dans un tissu urbain de hauteur similaire à la hauteur de la maille. (Gandemer 1975)

En bref, on peut résumer cet ensemble de constatations par la conclusion suivante : l'effet de protection des mailles, dont le périmètre est construit sur au moins 75% de sa circonférence, est d'autant plus important que $S/(h^2)$ est faible (idéalement inférieur à 30 pour des mailles en site dégagé mais allant jusqu'à 300 pour des mailles en site urbain), avec des ouvertures sous le vent. L'étude de Smith & Wilson nous a montré qu'une maille totalement fermée peut présenter une superficie très protégée pour toutes les directions du vent tant que le rapport S/h^2 est inférieur ou égal à 100.

Il faut toutefois signaler que si l'augmentation de la hauteur des bâtiments favorise le confort des piétons à l'intérieur de la maille, il est tout de même nécessaire de prendre en compte les effets critiques qu'elle peut éventuellement générer autour de la maille (effets de coin, ...).

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de maille qui assure un espace confortable pour les piétons, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **augmenter la hauteur des bâtiments** pour augmenter la superficie de la zone protégée à l'intérieur de la maille.
- **créer une maille la plus continue possible**, en construisant des murs ou des barrières végétales là où aucun bâtiment ne peut pas être construit.
- **orienter la maille** de manière à ce que ses ouvertures soient sous les vents dominants.
- **densifier l'environnement de la maille**, par des bâtiments de hauteur homogène et similaire à la hauteur de la maille.

A retenir...

Un effet de maille peut apparaître pour les configurations construites en boucle dont la hauteur moyenne des bâtiments est supérieure à leur épaisseur et dont la longueur non construite de cette boucle ne représente pas plus de 25% du périmètre de la maille.

L'effet de protection généré au cœur d'une maille est d'autant plus important que :

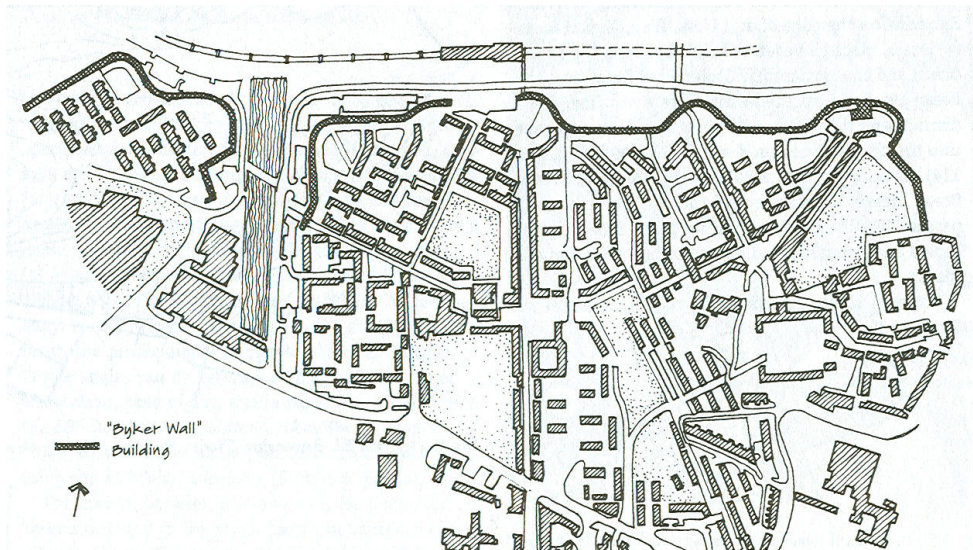
- le rapport entre sa superficie intérieure et le carré de sa hauteur est faible,
- la maille est davantage fermée,
- les ouvertures sont placées du côté sous le vent,
- l'environnement construit est formé de bâtiments d'une hauteur équivalente à celle de la maille.

4.4.13 L'effet d'écran linéaire

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet protecteur dû à un écran linéaire. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature.

Les études ont montré qu'un bâtiment long et continu placé comme façade au vent par rapport à une zone urbaine peut réduire les vitesses de vent entre les bâtiments de ce quartier jusqu'à 15% dans la direction du vent obstruée (Givoni 1969).

Ainsi, le « Byker Redevelopment », à Newcastle upon Tyne, en Angleterre, conçu par Ralph Erskine, est situé sur une pente faisant face au sud-ouest avec une vue vers le centre ville de Newcatle. Erskine a protégé ce quartier du vent en créant de longs rubans bâtis fermant le quartier aux vents d'orientation nord. Cette longue bande de bâtiments étroits bloque le vent venant de la mer du Nord et isole en même temps le centre de la communauté du bruit généré par le train et le trafic automobile. (Brown et De Kay 2001 à partir de Collymore 1994).



Site Plan, Housing at Byker, Newcastle-Upon-Tyne, England, Ralph Erskine

(Brown et De Kay 2001).

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet d'écran linéaire qui assure un espace confortable pour les piétons, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **allonger le premier bâtiment face au vent de manière à créer une bande construite** perpendiculairement aux vents dominants.
- **augmenter la hauteur de l'écran linéaire.**
- **combler les espacements entre les bâtiments face au vent par des écrans poreux (végétation, ...)** de manière à assurer la continuité de la protection.

A retenir...

L'**effet de protection** généré dans le sillage d'un bâtiment ou d'un brise-vent peut être étendu à un quartier en créant un **écran continu** perpendiculairement aux vents dominants.

4.4.14 L'effet de pyramide



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet protecteur. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

Pour des formes pyramidales inférieures à 50m de haut et bien étagées, le rapport U/U_0 reste inférieur à 1. (Gandemer 1975)

Pour que l'effet de pyramide soit réellement efficace, il est toutefois important d'étagier le plus possible les niveaux. Si la gradation n'est pas assez progressive, les secteurs critiques seront

- les coins globaux de la pyramide.
- les balcons au vent et les terrasses au voisinage des crêtes.

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de pyramide, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment du centre vers les espaces publics de manière la plus continue possible (gradins progressifs), surtout à proximité des coins.**
- **densifier la zone proche des coins globaux de la pyramide**
- **protéger les coins globaux de la pyramide par des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...).**
- **couper les angles de la pyramide à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau des coins.**

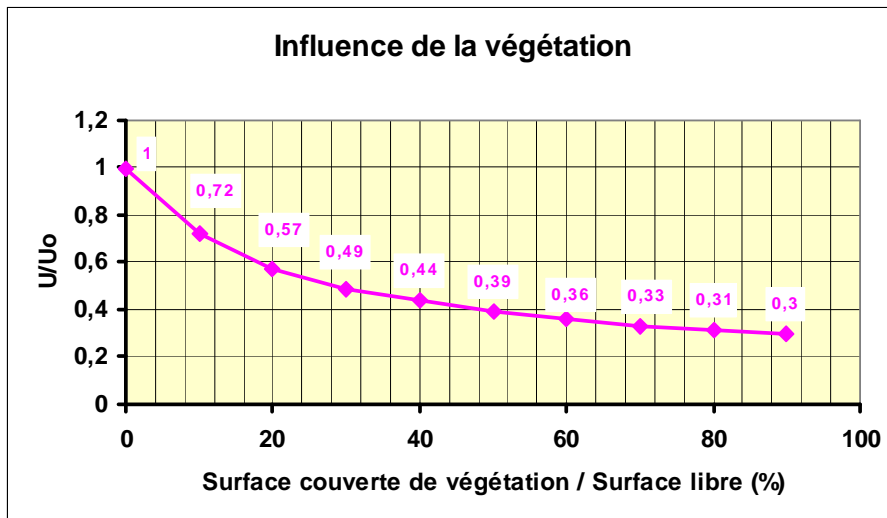
- **protéger les balcons** situés aux coins de la pyramide et à proximité de son sommet (volumétrie aérodynamique, garde-corps déflecteurs, ...).

A retenir...

Les formes pyramidales offrent un effet de protection par rapport au vent qui permet d'augmenter la hauteur d'un bâtiment tout en conservant le confort au niveau piéton. Il est important d'étager le plus possible les niveaux.

4.4.15 L'effet de la végétation

Pour la réduction du vent dans les zones suburbaines, une étude de Heisler montre que pour une densité bâtie inférieure à 25%, la réduction de la vitesse du vent entre les bâtiments due à la présence d'une végétation haute (haies,...) peut être évaluée à partir du graphe ci-dessous en fonction de la densité de végétation présente (Heisler 1989).



(Graphique élaboré d'après Heisler 1989).

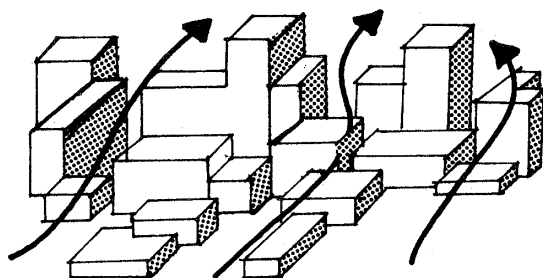
En réalité, un environnement comportant une végétation dense dépasse rarement une couverture de l'espace entre les bâtiments de plus de 25%.

Une étude in situ de Heisler confirme les ordres de grandeur donnés ci-dessus pour une couverture végétale comprise entre 25% et 10% de la surface libre entre bâtiments. De plus, cette étude montre que quand la végétation est dense, malgré la perte des feuilles en hiver, la réduction de la vitesse du vent y est importante. Par contre, lorsque les arbres sont isolés, la protection hivernale de la végétation à feuilles caduques devient négligeable. (Heisler 1989)

Pour une couverture végétale dense en hiver, nous conseillons d'utiliser l'outil graphique présenté ci-dessus et de majorer le rapport U/U_0 obtenu d'un facteur 10%, ce qui donne la formule suivante : U/U_0 en hiver = 1.1 * (U/U_0 en été).

4.4.16 L'effet de masque urbain

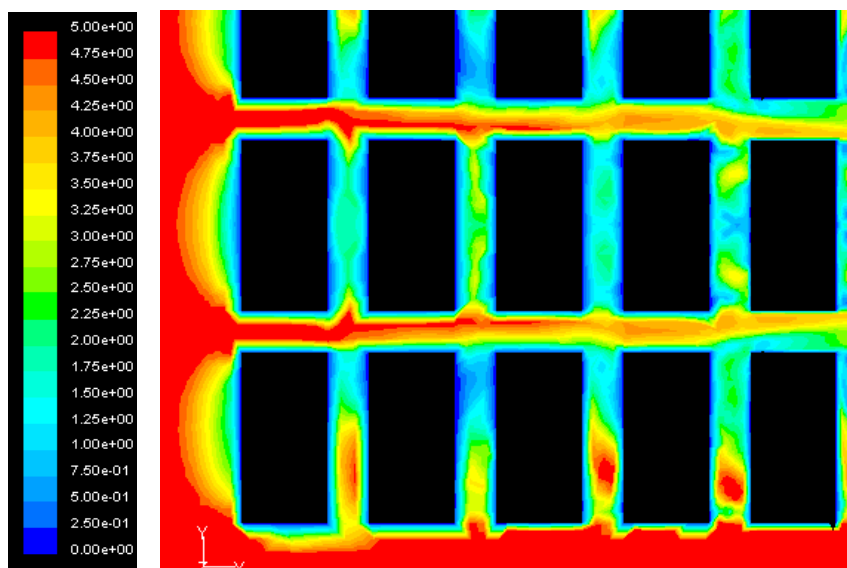
L'effet de masque urbain génère une zone de protection étendue sur l'ensemble d'un tissu de hauteur relativement homogène et peu élevée.



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous considérons comme un milieu de hauteur relativement homogène tout milieu urbain pour lequel la hauteur des bâtiments les plus élevés reste inférieure au double de la hauteur moyenne du tissu urbain considéré. Dans les espaces publics d'un milieu urbain dense et de hauteur relativement peu élevée, les vitesses moyennes de l'air sont faibles, typiquement de l'ordre de 0.3 à 0.8 (Gandemer 1975).

Le graphique ci-dessous provient d'une simulation réalisée avec FLUENT pour un ensemble urbain de 7 x 3 blocs de 100m de long, 50m de large et 19m de haut espacés de 25m les uns des autres. La couleur rouge correspond aux vitesses de l'air d'environ 5m/s, ce qui correspond à U_0 pour un terrain ouvert à 1.5m du sol et donc à la vitesse de vent qui arrive au niveau du front de l'urbanisation. On voit que le vent est ralenti sur une distance de trois blocs, c'est-à-dire 200m de long, dans la direction du vent et d'un demi bloc, c'est-à-dire 50m de long, dans la direction perpendiculaire au vent.



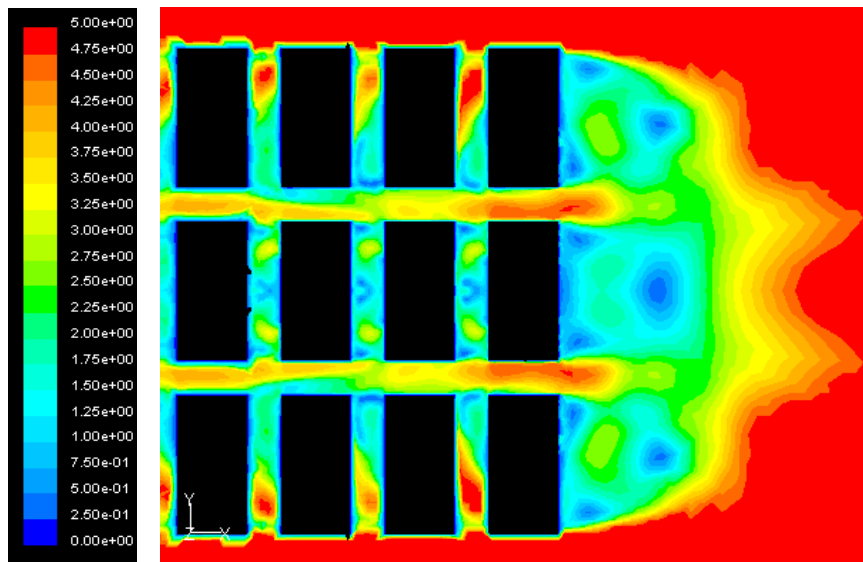
Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

Au-delà de cette bande périphérique de 200m de large dans la direction du vent et de 50m de large dans la direction perpendiculaire, les vitesses de l'air sont nettement plus faibles : le rapport U/U_0 moyen vaut 0.53 sur l'ensemble du tissu

urbain comprenant le dernier bloc de l'urbanisation ouvert sur une zone dégagée, 0.3 pour les rues protégées du vent et au centre de ce quartier, 0.61 pour les rues dans la direction du vent mais au centre du quartier et 0.84 pour la zone de la rue exposée au vent et ouverte sur la zone dégagée à l'arrière de l'urbanisation. Ainsi, l'ensemble des rues de ce tissu urbain assurent des conditions très confortables pour les piétons, au-delà d'une zone périphérique de 200m dans la direction du vent et 50m dans la direction perpendiculaire au vent.

Dans ce type de plan masse, la zone de probabilité d'accidents aérodynamiques la plus forte est une bande de l'ordre de 200 mètres d'épaisseur située en périphérie de l'urbanisation ou du quartier. En bordure de ville, placer les îlots en quinconce est utile pour réduire la vitesse du vent sur cette zone plus exposée.

La simulation ci-dessous montre qu'au-delà d'un quartier urbain dense de hauteur homogène et peu élevé, on trouve une zone de grande protection d'environ 100 m de long. Au-delà de 200m après l'urbanisation, l'effet de masque urbain a disparu. Les rues au vent s'ouvrant sur un large espace ouvert perdent également les bénéfices de l'effet de masque urbain sur une distance environ égale à 50m. Cette accélération de l'air se prolonge par un effet de jet de 25m de long dans l'espace ouvert. Ce phénomène ne génère toutefois pas de vitesses de l'air réellement inconfortables.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

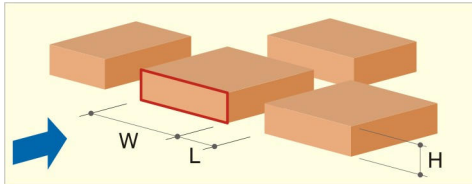
Ainsi, en dehors de la bande périphérique de 200m, un tissu urbain dense de hauteur homogène assure l'effet de masque urbain sur la totalité de ses espaces publics sauf s'il comprend des espaces découverts de grande superficie (plus de 200m de long sur au moins 200 m de large). Dans ce cas, le vent va "retomber" dans ces espaces libres et les bâtiments périphériques seront à nouveau exposés. Il faudra atteindre alors une pénétration de 200 mètres pour retrouver un effet de protection global dans le milieu construit.

Du point de vue du confort au vent, nous conseillons donc une répartition de places et d'espaces verts de taille moyenne à travers la ville plutôt que quelques grands espaces ouverts. Les parcs ou zones ouvertes de très grande dimension ont intérêt à être fortement plantés de manière à recréer un effet de masque dû à la végétation.

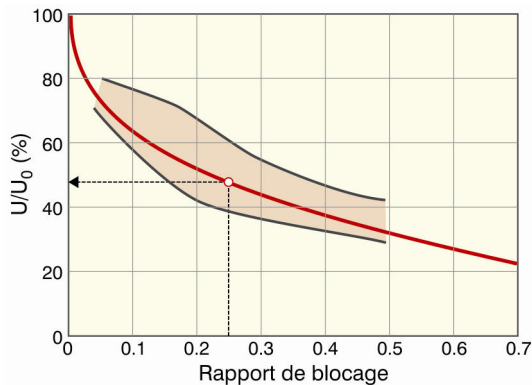
C'est grâce à cet effet de masque urbain que des mailles poreuses, ayant un coefficient S/h^2 atteignant 300, offrent une bonne protection contre le vent lorsqu'elles sont intégrées dans un milieu urbain de hauteur homogène et environ égale à la hauteur de la maille (Gandemer 1975). Ainsi, les intérieurs d'îlots urbains sont généralement des zones très protégées du vent.

La vitesse du vent dans les rues décroît avec l'augmentation du rapport de blocage des îlots urbains. Les dimensions horizontales des îlots influencent légèrement la vitesse de l'écoulement du vent mais dans une moindre mesure. Le rapport de blocage peut être calculé par la formule suivante :

$$R_b = (W \cdot H) / (W + L)^2$$

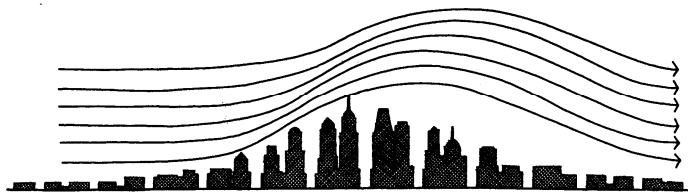


Le graphe ci-dessous montre la vitesse de l'air dans les rues en fonction du rapport de blocage des îlots urbains. Cette méthode n'est valide que si la rue en question est au moins à 200 m de la limite du groupe bâti. (Brown et De Kay 2001).



(Brown et De Kay 2001).

La présence d'un bâtiment de hauteur supérieure à deux fois la hauteur moyenne d'un tissu urbain dense de hauteur homogène supprime localement l'effet de masque urbain (Gandemer 1975). Ce type de configurations urbaines est étudié au point 4.4.18. Les changements de hauteur abrupts créent toujours des problèmes au niveau piéton. Ainsi, des zones de transition doivent être créées pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente. Une évolution graduelle de la hauteur des bâtiments permet à une partie importante du vent de passer au-dessus des toits. La hauteur des bâtiments d'un îlot ne devrait pas dépasser le double de la hauteur de l'îlot précédent (du point de vue de la direction du vent). Par exemple, si un bâtiment mesure 15m de haut, le bâtiment suivant dans la direction des vents a une hauteur maximale de 30m.



(Brown et De Kay 2001)

Pour les ensembles formés de bâtiments très élevés de hauteur homogène, un effet de masque peut apparaître sur certaines zones mais des zones de survitesses seront également présentes. En général, ces milieux bâtis sont critiques pour les piétons. Ce type de tissu urbain est étudié au point 4.4.19.

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de masque urbain, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **prévoir des hauteurs de bâtiments relativement homogènes**, c'est-à-dire créer des zones de transition pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.
- **disposer les îlots urbains en quinconce en bordure de la zone urbaine dense**, sur une bande large de 200m.
- **prévoir des places et des espaces verts de dimension moyenne** ($S < 40\,000\text{ m}^2 = 200 \times 200\text{m}$).
- **planter les rues de grande longueur en bordure de la zone urbaine dense**, afin de profiter de l'effet de protection de la végétation.
- **placer des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) sur les places et dans les parcs de grande dimension** ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$), afin d'y ralentir l'écoulement du vent

A retenir...

L'effet de masque urbain génère une zone de protection étendue sur l'ensemble d'un tissu de hauteur relativement homogène et peu élevée.

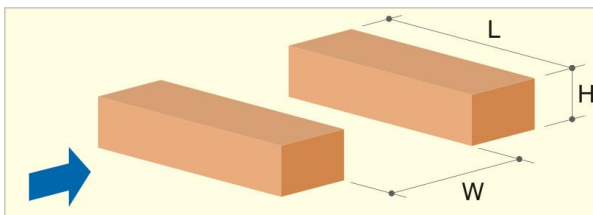
La vitesse du vent dans les rues décroît avec l'augmentation du rapport de blocage des îlots urbains. La vitesse de l'air en intérieur d'îlot dépend du rapport S/h^2 entre sa surface intérieure et le carré de la hauteur des bâtiments.

Les seules zones à risque dans ce type de plan masse sont :

- une bande de 200m située en bordure de l'urbanisation dense,
- les zones ouvertes de grande taille ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$) et le périmètre de 200m de large qui les entoure,
- les zones au pied d'un bâtiment dont la hauteur est égale ou supérieure au double de la hauteur moyenne du tissu urbain.

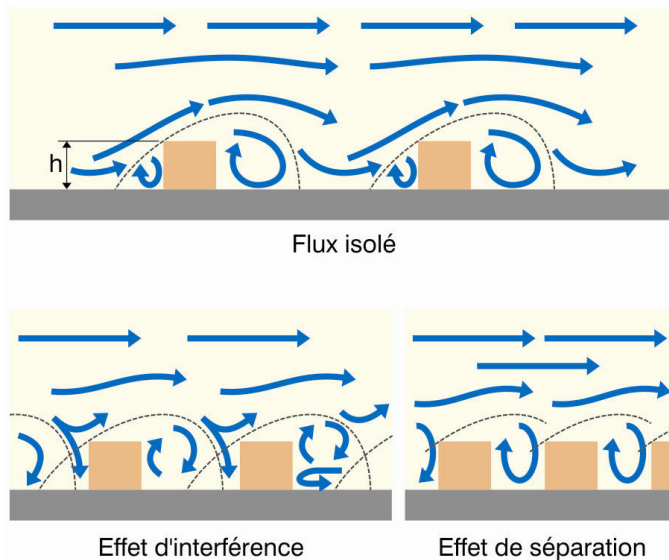
4.4.17 L'effet canyon

Lorsque les bâtiments sont construits en mitoyens, ils forment des rues qui créent un effet de masque supplémentaire par rapport au vent: l'**effet canyon**. Pour que cet effet existe, il faut toutefois que la distance entre les deux côtés de la rue ne soit pas trop élevée.



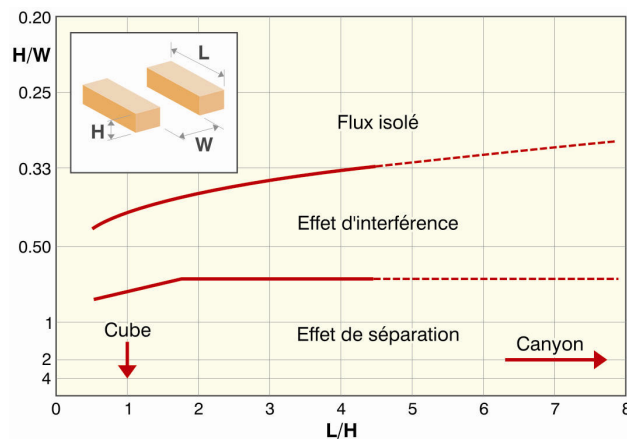
Quand le vent est plus ou moins perpendiculaire au grand axe des rues (disons à 30° près dans chaque sens), trois types de régimes de vent sont observés en fonction des dimensions des rues. Lorsque les bâtiments sont très distants ($H/W < 0.3$), ils n'interagissent pas au niveau de l'écoulement de l'air : on parle de « flux isolé » (isolated roughness flow). L'air extérieur pénètre donc largement dans l'espace qui est bien ventilé. Lorsque cet espace diminue ($0.3 < H/W < 0.7$), le flux se modifie et forme un « effet d'interférence » (wake interference flow). Ce flux se caractérise par des mouvements secondaires dans l'espace de la rue, là où l'effet de sillage de la face sous le vent est renforcé par l'effet de rabattement de la face au vent du bâtiment suivant. L'air extérieur pénètre moins dans le canyon que dans le cas précédent. Lorsque W diminue encore ($H/W > 0.7$), une circulation faible mais stable s'établit dans le canyon ; on parle d'« effet de séparation » (skimming flow). L'air extérieur entre faiblement dans le canyon et l'air intérieur crée une boucle de recirculation. L'entrée d'air neuf et la circulation de l'air intérieur sont d'autant plus réduites que le rapport H/W sera élevé. (Oke 1988)

Le graphe ci-dessous montre les trois types de régimes de vent pour une incidence du vent perpendiculaire à une canalisation linéaire.



(Oke 1988).

Pour les rues de petite longueur pour lesquelles l'effet de bord est important, les transitions entre ces trois régimes d'écoulement du vent sont données dans le schéma ci-dessous (Oke 1988).



(Oke 1988).

En général, la longueur des rues (L) est assez large. Le passage entre le flux de type isolé et le régime basé sur des interférences entre bâtiments correspond donc à une rue d'une largeur égale à environ 3 hauteurs de bâtiments ($H/W=1/3$ ou $W/H=3$). Le passage entre le régime d'interférences entre bâtiments et le flux qui passe au-dessus de tout l'espace public est situé à une limite qui correspond environ à une rue dont la largeur est égale à 1.5 hauteurs de bâtiments ($H/W= 2/3$ ou $W/H=1.5$).

Dans le cas de l' « effet de séparation », le flux d'air dans la rue peut être interprété comme un flux secondaire créé par le flux au-dessus des toits. Lorsque la vitesse du vent au-dessus des toits n'est pas suffisante, le couplage entre le flux du dessus et du dessous est perdu.

Dans les canyons profonds (par exemple $H/W=2.5$), des tests en tunnel à vent ont montré que deux circulations apparaissent sur la hauteur du canyon et que les vitesses du vent au niveau piéton deviennent très faibles.

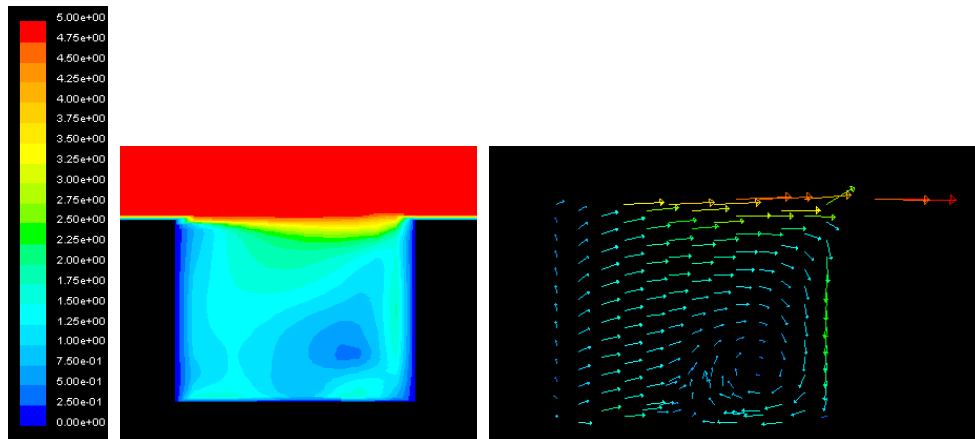
Si nous prenons l'ensemble des longueurs de rues possibles, l'effet canyon apparaît pour des rues dont le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue est supérieur ou égal à 0.7. (c'est-à-dire pour $H/W \geq 0.7$), ce qui assure de se trouver dans la zone de flux séparé (« skimming flow »).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer la vitesse moyenne du vent dans une rue soumise à l'effet canyon ($H/W \geq 0.7$) en fonction de l'incidence du vent, de la vitesse du vent au-dessus des toits et des dimensions de la rue.

Rue parallèle au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 à 0.3 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.5 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$H/W \geq 0.7$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent
Rue perpendiculaire au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.4 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$0.7 \leq H/W < 2$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent . $U_{\text{canyon}} = p U_{\text{toit}}$ avec p compris entre 0.66 et 0.75
	$H/W > 2$ et $L/W > 20$	0.3 m/s
Rue oblique par rapport au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.4 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$H/W \geq 0.7$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent

(d'après Santamouris & al. 2000 pour les données en noir ; d'après Nakamura & Oke 1988 pour les valeurs en bleu, U_{canyon} ayant été mesuré à $0.06H$ et U_{toit} à $1.2H$)

Les coupes ci-dessous présentent les résultats obtenus à l'aide de FLUENT des mouvements d'air dans un canyon perpendiculaire au vent dont le rapport H/W vaut 0.76. Les bâtiments ont 19m de haut et la largeur des rues est de 25m. Le premier graphique donne les courbes iso-vitesses et le second les vecteurs-vitesses. Le rapport U/U_0 reste inférieur à 0.4 au niveau piéton dans ce type de rues protégées du vent.



Effet canyon : courbes iso-vitesses et vecteurs-vitesses en coupe perpendiculaire au vent.

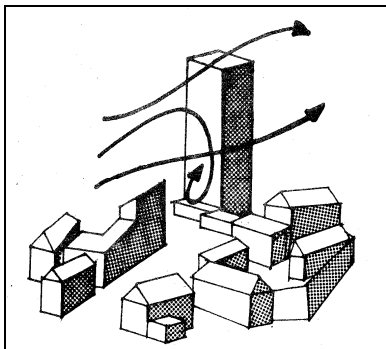
Conseil pratique:

Pour limiter au maximum les vitesses de vent dans les rues, il est utile d'assurer l'effet canyon qui est très confortable pour les piétons, en appliquant la règle géométrique suivante : **le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue doit être supérieur ou égal à 0.7** (c'est-à-dire pour $H/W \geq 0.7$),

A retenir...

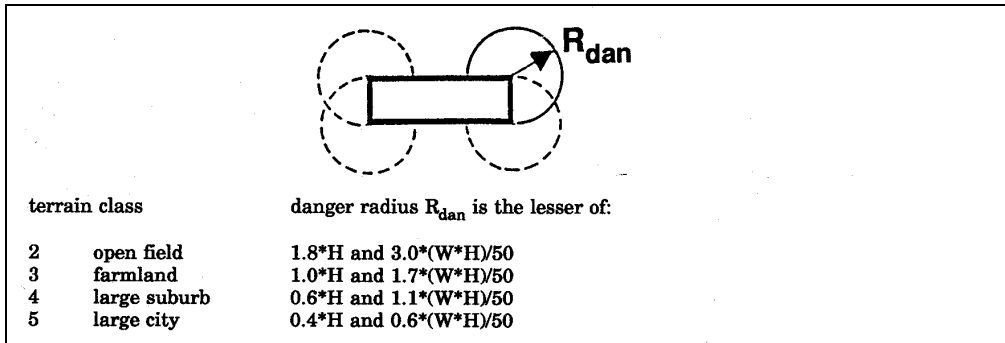
Les rues étroites ($H/W \geq 0.7$) créent un effet de masque important : l'effet canyon.

4.4.18 L'écoulement du vent autour d'un bâtiment élevé implanté en milieu urbain dense



(Gandemer & Barnaud 1975).

L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible, dont un exemple type est le tissu ancien de nos centres villes, perturbe de manière violente le pied immédiat de la tour. De plus, sa présence accroît nettement les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé. Le schéma ci-dessous permet d'évaluer le rayon critique autour des coins d'un bâtiment élevé en fonction de la densité construite. (Bottema 1993)

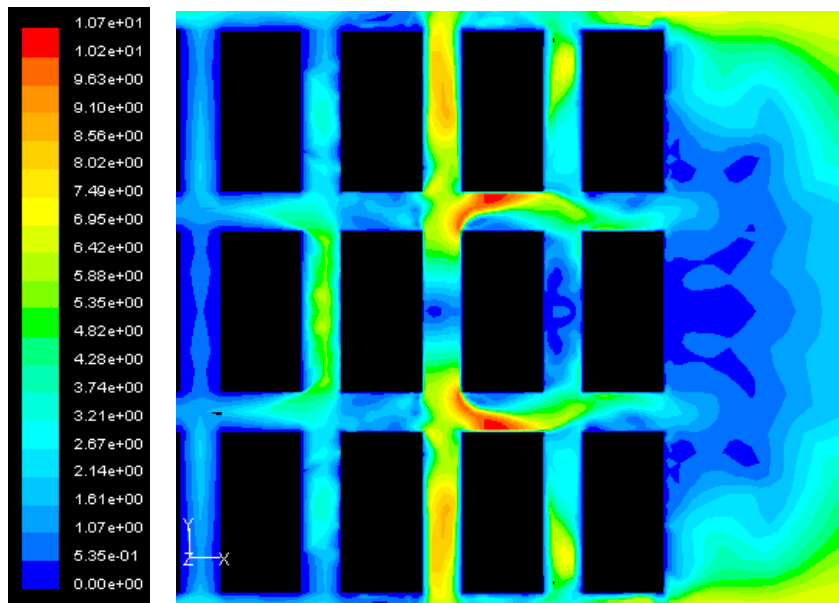


(Bottema 1993).

Cependant, l'inconfort généré au pied du bâtiment élevé est diminué par rapport à l'inconfort au vent au pied d'un immeuble de même hauteur en site totalement dégagé.

Les bâtiments élevés sont les bâtiments dont la hauteur est au moins du double de la hauteur moyenne du tissu urbain environnant. La vitesse maximale de l'air au niveau piéton dépend essentiellement dans ce cas du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h . Lorsque le rapport H/h s'accroît, le rapport U/U_0 au niveau piéton augmente.

Nous avons réalisé la simulation suivante avec notre profil de vent urbain habituel. Le graphique ci-dessous présente les effets critiques du vent autour d'un bâtiment de 76m de haut au sein d'un milieu urbain formé de blocs homogènes de 19m de haut, 100 m de long et 50m de large. Le rapport H/W des rues vaut 0.76.



Survitesse à 1.5m de haut au pied d'une tour de 76m de haut ($H/h=4$).

Ainsi, la présence d'un bâtiment très élevé modifie totalement le comportement de l'air dans les rues avoisinantes.

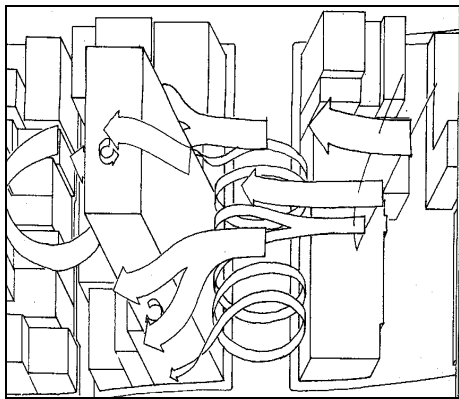
Le tableau ci-dessous montre que ce milieu urbain a réduit l'effet de coin maximal au pied du bâtiment de 76m de haut, dont la hauteur est quatre fois la hauteur des bâtiments environnants : $H/h = 4$, d'un peu plus de 10% par rapport à l'effet de coin au pied d'un bâtiment isolé mais qu'il n'a pas modifié l'intensité de l'effet de rouleau tourbillonnaire (qui n'est pas un effet critique s'il est pris isolément dans ce cas).

Effets critiques du vent	Bâtiment élevé isolé (H=76m)	Bâtiment élevé dans un milieu urbain dense (H=76m et H/h=4)
Effet de coin	2.38	2.12
Effet de rouleau tourbillonnaire	1.2	1.2

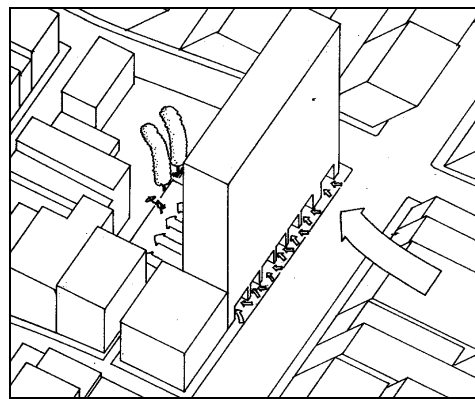
Il faut absolument éviter de construire des bâtiments élevés à proximité des espaces publics de détente : places publiques, squares, plaines de jeux,... Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Pour les bâtiments élevés, la meilleure protection au vent est toujours la diminution de sa hauteur.

L'ensemble des effets critiques présentés pour des bâtiments isolés ou des groupes de bâtiments sont également présents lorsqu'un bâtiment ou un groupe de bâtiments de grande hauteur est implanté dans un tissu urbain homogène de faible hauteur :

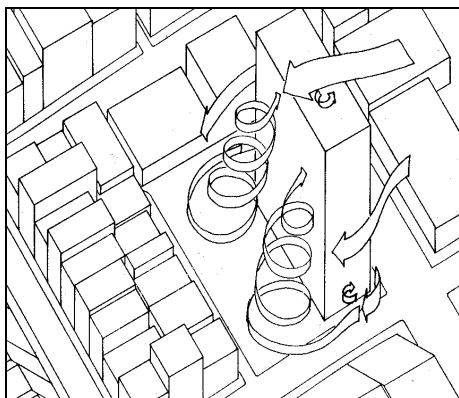
- l'effet de coin,
- l'effet de cisaillement,
- l'effet de trou sous immeubles,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre,
- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de double coin,
- l'effet de bâtiments en quinconce
- l'effet de canalisation linéaire.



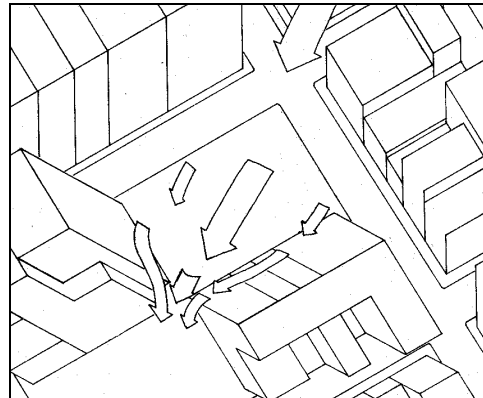
(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)

Les bâtiments très élevés et le confort des piétons en milieu urbain sont donc difficiles à concilier.

Pour un bâtiment ou un groupe de bâtiments dont la hauteur est comprise entre 15m et 40m et dont la hauteur est double de la hauteur moyenne du tissu urbain, les différents effets critiques du vent doivent être évalués et des mesures doivent éventuellement être prises pour réduire l'inconfort au niveau piéton. Tous les bâtiments de plus de 40m de haut en milieu urbain devraient faire l'objet d'une étude spécifique de leur impact sur le confort et la sécurité des piétons aux abords de ceux-ci. (Penwarden & Wise 1975).

Conseils pratiques:

Pour réduire les vitesses de vent autour d'un bâtiment élevé implanté en milieu urbain, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment élevé**, afin de diminuer le rapport H/h entre la hauteur de ce bâtiment et la hauteur moyenne du tissu urbain,
- **diminuer la hauteur des parties du bâtiment qui longent l'espace public**, surtout près des coins, par des reculs, des gradins, des socles,...
- **créer des bâtiments élevés aux contours aérodynamiques ou des bâtiments qui présentent leur face la plus étroite vers les vents dominants.**
- **ajouter des terrasses horizontales d'au moins 6m de large.**

A retenir...

L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible ($H/h_{\text{moyen}} > 2$) crée des zones d'inconfort dans les rues adjacentes et accroît les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé.

L'intensité des survitesses au niveau piéton dépend essentiellement du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h .

4.4.18 Les effets du vent au sein des grands ensembles de bâtiments élevés

Les flux de vent au sein **de grands ensembles de bâtiments élevés** ont un haut degré de complexité. Les effets d'interaction peuvent décroître les vitesses de vent localement mais en général elles ont plutôt tendance à l'accroître. Les risques d'inconfort pour les piétons y sont élevés.

Il semble qu'il existe des espacements critiques à éviter absolument parce qu'ils ont pour effet de conduire à un rapport U/U_0 de l'ordre de 2 dans tout l'espace au sol. Pour les bâtiments élevés de type tour, ces espacements critiques sont :

- $E_c = 2d$, où d est la dimension moyenne transversale des tours.
- $E_c = H/2$, où H est la hauteur moyenne des tours.

En revanche si l'espace entre tours devient inférieur à $d/4$, la zone piétonne est protégée du vent mais il faut toutefois soulever dans ce cas le problème évident de l'obstruction face à l'ensoleillement.

C'est donc un espacement supérieur à $3d$ qui est le moins critique car, dans ce cas, les formes immeuble-tour ont tendance à se comporter comme des formes isolées (plus d'interférence directe), tout en permettant leur ensoleillement. Ce type de morphologie urbaine reste toutefois à déconseiller puisqu'on peut obtenir des densités équivalentes avec des bâtiments moins élevés qui apporteront donc de grands bénéfices au niveau du confort et des consommations d'énergie des bâtiments (plus faible exposition des surfaces).

Ce type de plan masse devrait être considéré avec une très grande prudence. Dans ce cas, nous conseillons fortement de réaliser des essais en soufflerie aérodynamique ou des simulations CFD spécifiques.

Conseils pratiques:

Pour limiter les survitesses du vent dans les grands ensembles de bâtiments élevés, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer les hauteurs des bâtiments, surtout le long des espaces publics.**
- **agrandir l'espace entre les bâtiments élevés jusqu'à une distance au moins égale à 3 fois la dimension transversale des tours ($E > 3d$).** afin d'éviter les interférences entre celles-ci
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) sur l'ensemble de la zone afin de réduire les vitesses de vent au niveau piéton.

A retenir...

Dans les grands ensembles de bâtiments élevés, les risques d'inconfort pour les piétons sont élevés.

5. Etude de l'ambiance sonore à l'extérieur des bâtiments

« *Quand un arbre tombe, on l'entend; quand la forêt pousse, pas un bruit* ». Proverbe africain.

Cette cinquième partie aborde l'analyse des ambiances sonores à l'extérieur des bâtiments. Elle met en évidence les caractéristiques d'un site qui influencent son ambiance sonore. Elle décrit les méthodes d'évaluation des paramètres acoustiques en milieu urbain.

5.1 Paramètres acoustiques

Le bruit en ville se compose de tous les bruits qui existent sur un site urbain et qui proviennent des animations et activités qui s'y déroulent. Le bruit est un indicateur de la vie présente en un lieu, une expression des échanges qui s'y produisent, une référence au contexte spatio-temporel traversé. Le bruit en ville s'avère donc souvent utile et indispensable. Il est cependant évident que certains types de bruit ou certains niveaux sonores sont inacceptables parce qu'ils engendrent une gêne significative.

L'urbanisme et l'architecture de la ville modifient la propagation du bruit et peuvent donc empêcher ou diminuer les situations d'inconfort acoustique dans les lieux extérieurs en ville. Ce chapitre va montrer comment le tissu urbain et les décisions d'urbanisme influencent les ambiances sonores de nos espaces publics.

Il faut d'abord signaler que l'ambiance acoustique est considérée par les habitants comme un paramètre essentiel du plaisir de vivre dans une urbanisation. Ainsi, l'ensemble des habitants de la Région de Bruxelles-Capitale se sentent concernés par les nuisances sonores en ville. De plus, le bruit est apparu en tête des nuisances qui poussent les citoyens à quitter la ville à la recherche d'un cadre de vie réputé plus vert et plus tranquille. Les différentes enquêtes menées par le Plan Régional de Développement à Bruxelles ont montré que près de 30% des bruxellois estiment que le bruit en ville est une nuisance susceptible de les pousser à déménager (IBGE 2002).

Des ambiances sonores confortables favorisent également l'utilisation des espaces publics urbains et ont une influence indirecte de limitation des consommations d'énergie des bâtiments (potentiel de ventilation naturelle des locaux,...) et du transport (rend plus agréable les trajets réalisés à pied ou à vélo,...).

En général, la gêne acoustique apparaît pour un niveau sonore égal ou supérieur à 65 dB (A). Toutefois, n'oublions pas que le décibel est une échelle logarithmique, afin de ne pas sous-estimer l'importance des mesures à prendre pour réduire les nuisances sonores. Pour gagner 3 dBA, il faut réduire le bruit de moitié ; pour gagner 5 dBA, il faut le réduire au tiers ; pour gagner 10 dBA, il faut le réduire de 9/10ème ; etc.

5.1.1 Les émissions de bruit en milieu urbain

Aujourd'hui, dans les villes européennes, la circulation routière apparaît nettement comme la première source de bruit en zone urbaine. Le bruit des avions et du trafic ferroviaire est aussi un facteur important de gêne acoustique pour de nombreux habitants. Il est à souligner que ces sources de bruit sont étroitement liées à d'importantes préoccupations urbaines : la mobilité, la sécurité, la pollution atmosphérique,...

L'analyse des sources mécaniques de type trains et tramways constitue un domaine de recherche complexe, notamment de part la nature du contact roue-rail. Nous n'aborderons pas le détail des solutions à envisager car il s'agit clairement d'une réflexion technologique spécifique mais le lecteur pourra toutefois se référer à des documents récents sur le sujet, disponibles à la Direction de la Recherche de la SNCF ou au SerB (bureau d'étude Nantais, spécialiste du bruit des tramways).

Nous n'étudierons pas non plus en détail les possibilités de réduction des bruits aériens qui ne sont pas vraiment du ressort de l'architecte.

Le bruit de la circulation automobile est le bruit urbain de loin le plus important. Il s'agit donc de diminuer en priorité le trafic automobile en ville. Dans la suite de ce chapitre, nous nous concentrerons sur le bruit dû à la circulation routière, qui est largement influencé par la conception urbaine et touche en général une grande partie des citoyens. Ainsi, environ 28% de la population bruxelloise totale est exposée à un niveau de bruit dû au trafic routier supérieur à 65 dB(A). (IBGE 2002)

Les nuisances sonores induites par le trafic automobile dépendent essentiellement de trois caractéristiques de la circulation, sur lesquelles on peut intervenir pour essayer de limiter l'émission de bruit:

- **l'intensité du trafic**, mesurée en nombre de véhicules par heure ou par jour.
- **le type de véhicules**, notamment la proportion de camions (plus bruyants que les voitures).
- **la vitesse moyenne des véhicules.**

Le type de revêtement de la chaussée et la pente de la voie ont également une influence sur le niveau sonore produit par la circulation.

Pour une première évaluation du niveau sonore émis par le trafic automobile, on peut faire le calcul suivant (Semidor 2002) :

$$E = (E_{VL} + 10 \log Q_{VL}) + (E_{PL} + 10 \log Q_{PL})$$

où E_{VL} est l'émission sonore unitaire des véhicules légers,

E_{PL} est l'émission sonore unitaire des véhicules lourds

Q_{VL} = débits horaires moyen des véhicules légers,

Q_{PL} = débits horaires moyen des poids lourds.

E: l'émission sonore d'un tronçon d'infrastructure

L'intensité du trafic est le premier critère du point de vue des émissions sonores. En quelques décennies, le parc automobile a augmenté considérablement dans toutes les villes. Or les véhicules actuels ne sont pas beaucoup moins bruyants que ceux d'hier. Sur les grandes artères, le bruit varie constamment entre 70 et 80 dBA, atteignant des pointes fréquentes de 85 à 90 dBA. Mais surtout le bruit est devenu omniprésent : il suscite des nuisances non seulement sur les voies principales, mais

dans les quartiers et les banlieues, de jour comme de nuit. On assiste à un phénomène généralisé d'extension du bruit plutôt que d'intensification là où les niveaux sonores étaient déjà élevés. Le calme est devenu rare et contribue à la valeur immobilière des bâtiments. En outre, les tendances ne promettent pas une réduction spontanée du bruit, bien au contraire, puisque les gens achètent de plus en plus de voitures.

De manière assez approximative, on peut dire que le bruit moyen augmente de 3 à 5 dBA lorsque le flot de véhicules double; c'est dire, réciproquement, qu'il faut diminuer le trafic de moitié pour gagner de 3 à 5 dBA. La lutte contre le bruit réclame donc des réductions considérables du trafic ! Toutefois, des mesures aussi importantes seront de toute façon nécessaires pour réduire la pollution de l'air et... améliorer la circulation automobile elle-même.

Une analyse des différents **types de véhicules** au niveau du bruit généré (puissance sonore et fréquence) a permis de distinguer deux grandes classes de véhicules à quatre roues:

- les véhicules légers : voitures particulières et utilitaires,
- les poids lourds et trains routiers.

En moyenne, la seconde classe de véhicules émet un niveau sonore supérieur de 3dB(A) par rapport à la première. (Picaut & al. 2001)

Sur ce point de vue, on peut espérer le développement d'autres types de véhicules moins bruyants. Aujourd'hui, aucune alternative ne concurrence sérieusement l'automobile auprès du grand public mais il est très possible que, d'ici quelques années, la voiture électrique urbaine soit en mesure de résoudre à la source le problème des nuisances sonores générées par le trafic en ville.

Rappelons également l'intérêt de favoriser l'utilisation de moyens de transport en commun, qui présentent le grand avantage de ne pas générer un bruit permanent, et la création d'itinéraires agréables pour piétons et cyclistes.

La **vitesse de circulation** est l'un des principaux facteurs qui déterminent la production de bruit. De manière très approximative, on peut dire qu'au-dessus de 20km/h et en-dessous de 60 km/h, chaque augmentation de la vitesse de 10 km/h augmente le niveau sonore de 3 dB(A). Cependant, dans cet intervalle de vitesse, le bruit émis par le contact roues-sol et le type de conduite (nerveuse ou calme) des automobilistes influencent également le niveau sonore généré. Par exemple, une augmentation de la vitesse de 30 à 50 km/h entraîne, selon le type de revêtement, une augmentation sonore de 6 dB(A) sur de l'asphalte très ouvert et de 8.7 dB(A) sur des dalles en pierre naturelle (IBGE 1998). Généralement, au-dessus de 60 km/h, le bruit moyen augmente de 6 à 9 dBA chaque fois que la vitesse double.

Depuis le début des années 80, plusieurs villes allemandes, hollandaises et norvégiennes développent et comparent des expériences de "zones à 30 km/h". L'idée est simple : instaurer une limite de vitesse obligatoire à 30 km/h dans certains quartiers bien délimités en dehors des voies de circulation principales. Les expériences systématiques et les bilans réalisés après des périodes d'essai aboutissent aujourd'hui à des conclusions précises. Les mesures de bruit réalisées dans les quartiers expérimentaux concordent toutes, au moins au niveau des ordres de grandeur:

- dans les quartiers où l'on s'est contenté de mesures de signalisation peu coûteuses, le bruit diminue de 3 à 6 dBA ;
- dans les zones à 30 km/h plus complètes, on parvient à gagner de 5 à 10 dBA.

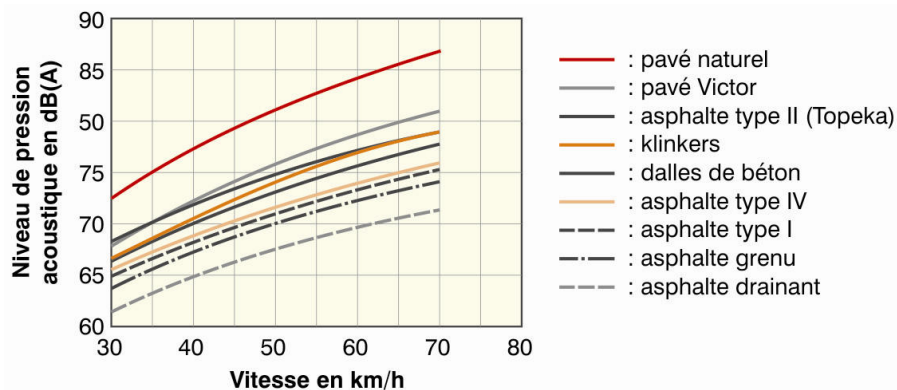
Il paraît donc assuré que la mise en place de zones à 30 km/h permet de diminuer le bruit dans des proportions équivalant à une réduction de 50% du volume du trafic, sinon plus. En outre, les limitations de vitesse des véhicules à 30 km/h renforcent la sécurité des rues, notamment pour les enfants et les personnes âgées. A cet égard, l'efficacité des zones à 30 km/h n'est pas contestée. Ainsi, à Hambourg, où la réduction de vitesse est bien respectée par les automobilistes, on a observé en 1984 une diminution globale de 11 % des accidents, et plus précisément une réduction de 47% des accidents corporels.

D'autre part, le temps perdu aux vitesses maximales est généralement rattrapé par une circulation plus lente mais plus fluide, plus régulière, moins heurtée. Ce type d'observation est bien connu des ingénieurs de trafic : les vitesses rapides favorisent la formation d'embouteillages ou des ralentissements aux points critiques et les alternances de vitesses rapides et d'arrêts engendrent des émissions polluantes accrues au niveau sonore et atmosphérique.

Le **revêtement des chaussées** a aussi son importance au niveau de l'émission des bruits urbains. Un revêtement en pavés augmente le bruit de roulement de 6 à 8 dBA par rapport à une chaussée en asphalte. En revanche, certains revêtements spéciaux peuvent le réduire de 4 à 5 dBA pour les chaussées les plus bruyantes.

Les revêtements routiers peuvent être classés en quatre catégories du moins bruyant au plus bruyant : les revêtements en asphalte, les revêtements en béton, les dalles en pierre naturelle et les pavés bombés (« belgian blocks »). Nous pouvons dire en général qu'un revêtement est plus silencieux à mesure que la couche de recouvrement a une grande capacité d'absorption acoustique, que la mégastucture est petite (pas de grandes irrégularités) et que les petits granulats dominent dans la macrotexture.

Le graphe ci-dessous résume les résultats des mesures réalisées par l'IBGE pour évaluer le bruit en dB(A) généré par un véhicule en fonction de sa vitesse, sur 9 revêtements routiers différents. (IBGE 1998)



(IBGE 1998).

Cependant, l'exécution et la qualité d'entretien d'un même type de revêtement routier peuvent également influencer le niveau d'émission sonore. Il est donc conseillé de restaurer les fortes irrégularités de certains revêtements de sols. Cette mesure peut souvent entraîner d'importantes réductions de bruit à faible coût. Elle permet également de préserver le caractère esthétique des revêtements de routes en dalles naturelles.

Les **pentés** importantes augmentent le niveau sonore produit par les voitures, surtout au démarrage (moteurs) et à l'arrêt (freins).

5.1.2 La propagation du bruit en milieu urbain

Pour concevoir des ambiances sonores, il faut également comprendre les éléments qui influencent la propagation des sons en milieu urbain, tels que : l'affectation des sols, la distance à la source de bruit et les caractéristiques du tissu urbain :

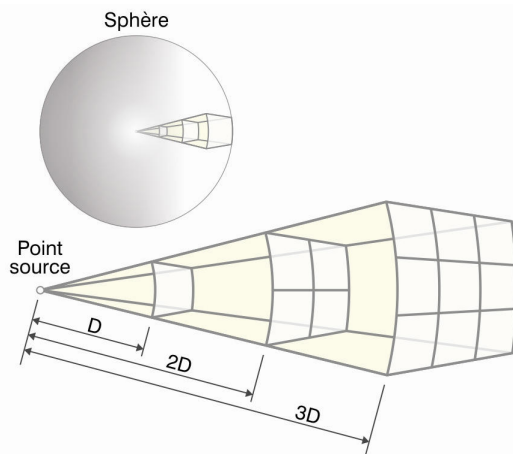
- la **morphologie** bâtie.
- la **forme** de la rue. Aux rues ouvertes s'opposent les rues corridors où le bruit est réverbéré contre les façades.
- la **largeur** de la chaussée, opposant boulevards et rues étroites
- le **traitement des surfaces**.
- la présence d'**espaces tampons**

L'utilisation des **différences de niveaux** et des **zones de végétation dense** permet de séparer une ambiance sonore de son environnement large. En milieu ouvert, il faut aussi signaler l'influence du **vent** sur la propagation des bruits.

Attribuer une zone à telle ou telle activité particulière (industries, commerces, bureaux, habitat) ou à une mixité des fonctions ainsi qu'à certains types de circulation (piétonnier, zone 30, voirie avec ralentisseurs de vitesse,...) conditionnera inévitablement le type de bruit généré par ces activités et l'ambiance sonore des lieux. Ainsi, le **type d'affectation du sol** est important du point de vue du confort acoustique dans les espaces publics. En effet, l'affectation du sol influence le trafic (intensité, composition) et le cadre bâti (morphologie urbaine, géométries des espaces ouverts, matériaux utilisés,...) qui sont les deux éléments les plus importants du point de vue de l'émission et de la propagation du bruit en ville.

La **distance** par rapport aux sources de bruits est un élément essentiel de leur atténuation. En l'absence d'obstacles, le bruit diminue de 6 dBA chaque fois que la distance à une source ponctuelle de bruit double.

Considérons une source ponctuelle (par exemple une voiture ou un avion,...) dans un espace extérieur libre sans réverbération : le son est diffusé de manière quasiment identique dans toutes les directions à partir de ce point. La ligne enveloppante des points d'énergie sonore identique est donc la surface d'une sphère. Si l'on double le rayon de la sphère (c'est-à-dire si l'on se trouve deux fois plus loin de la source ponctuelle), la surface de la sphère augmente 4 fois et l'énergie sonore est donc 4 fois plus faible en un point de cette sphère.



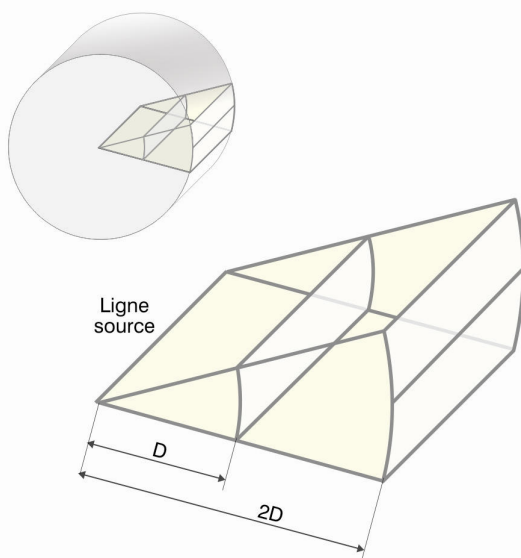
(Blasco 2002).

L'énergie sonore en un point de la sphère peut être trouvée selon la formule suivante qui donne un niveau en dB:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) = L_w - 20 \lg r - 11$$

où L_w est le niveau de puissance sonore de la source ponctuelle et r est la distance entre la source ponctuelle et le récepteur initial en mètres. Donc, à chaque doublement de la distance d'une source ponctuelle (dans un champ libre), le niveau sonore diminue de 6 dB. En pratique, en milieu urbain, le bruit diminue de 3 ou 4 dB chaque fois que la distance à une source ponctuelle de bruit double, en raison des réflexions contre le sol, les bâtiments environnants,...

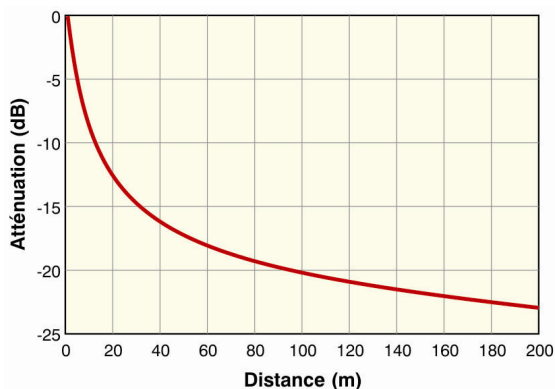
Pour une source linéaire ou un ensemble de sources ponctuelles se succédant en ligne droite (par exemple une rue à haut trafic, une autoroute, une voie de chemin de fer...), le même raisonnement nous amène à définir un cylindre d'égale énergie sonore.



(Blasco 2002).

Dans un champ libre, doubler la distance par rapport à une source linéaire correspond donc à diminuer le niveau sonore de 3 dB. Une source linéaire peut toutefois être considérée comme une source ponctuelle à partir d'une certaine distance égale à 2 fois la dimension la plus large de la source.

Le graphe ci-dessous donne l'atténuation du niveau sonore (dB) en fonction de la distance par rapport à une source linéaire : une route. (Gay 2004-b)



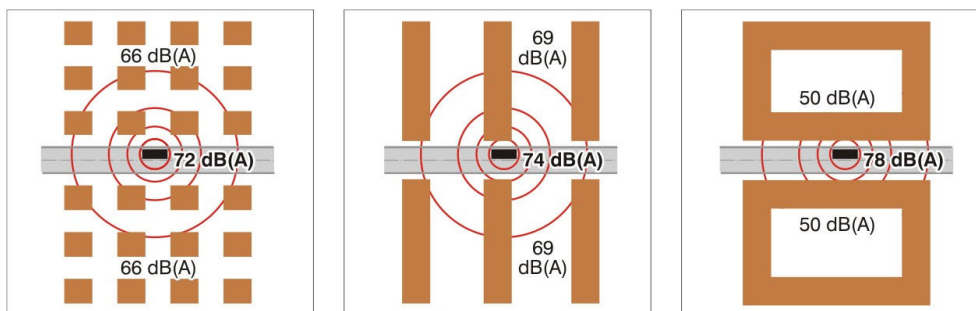
Atténuation du niveau sonore en fonction de la distance de la route (Gay 2004-b)

Dans un espace clos, il y a deux champs autour d'une source sonore : le champ direct et le champ réverbéré. Dans le champ direct, l'intensité décroît en fonction de la distance par rapport à la source. Dans le champ réverbéré, l'intensité varie en fonction de la constante de l'espace et du coefficient d'absorption des matériaux des surfaces le délimitant.

La **morphologie bâtie** influence fortement les ambiances acoustiques. Une réflexion sur l'aménagement urbain peut limiter les nuisances sonores en ville, par un travail sur les formes urbaines : détermination des limites, des épaisseurs, de la perméabilité des tissus, des zones calmes ou animées,... Il s'agit donc d'analyser le positionnement des bâtiments en plan et en coupe, c'est-à-dire les alignements, retraits, dissociations, orientations, traitement des angles, espaces tampons,...

Le graphe ci-dessous permet de comparer trois morphologies urbaines du point de vue de leur impact sur le bruit urbain :

- l'urbanisme pavillonnaire, constitué de maisons séparées les unes des autres, expose toutes ses façades au bruit urbain,
- la barre moderne perpendiculaire à la rue augmente son niveau sonore par réflexions multiples sans créer de protection.
- la configuration traditionnelle des îlots augmente encore le niveau sonore dans les rues mais elle offre à l'intérieur des îlots des zones de calme et de détente (niveau sonore inférieur ou égal à 50 dBA) protégées du bruit généré dans les rues.



(D'après Roulet 2002).

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit.

Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

La prise en compte des problèmes de protection contre le bruit conduit à une réévaluation radicale des formes d'urbanisation. La forme traditionnelle de l'îlot apparaît aujourd'hui comme le modèle le plus adéquat pour protéger les habitants du bruit de la rue. Elle assure une bonne isolation acoustique au centre de l'îlot par rapport aux rues extérieures et y garantit un niveau sonore propice à la détente, même dans des quartiers où la circulation est très intense. On voit que le niveau sonore est le plus élevé au centre d'une rue bordée de bâtiments mitoyens mais ce

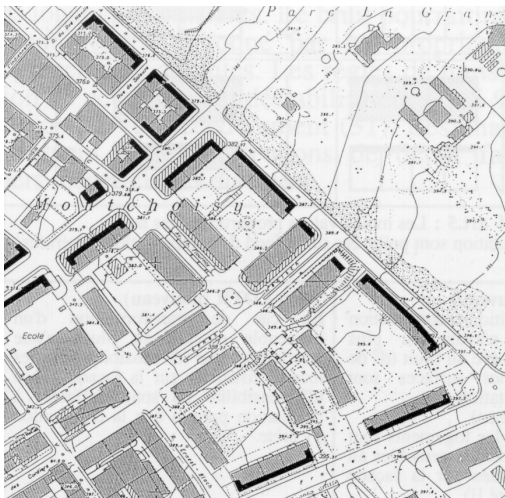
léger désavantage est contrebalancé par une très forte diminution du niveau sonore de l'autre côté de ces bâtiments, offrant des zones de calme et de détente. Au contraire, le modèle moderne de barres perpendiculaires aux voies et l'étalement urbain contemporain en petites maisons isolées exposent une majorité d'habitants au bruit de la circulation en générant un environnement sonore inacceptable sur l'ensemble de l'espace compris entre les bâtiments.

Ainsi, les formes bâties peuvent constituer un moyen efficace de lutter contre le bruit : une rangée d'immeubles continus est un écran acoustique, créant dans l'espace une polarité avant/arrière, bruyant/calme. Des immeubles mitoyens sont la meilleure barrière possible au bruit des rues. Les rez-de-chaussée sur pilotis sont évidemment à proscrire le long des rues où le trafic est important.

Les quartiers centraux d'une urbanisation ancienne sont généralement moins touchés par les nuisances sonores que les quartiers plus récents. En périphérie de ville, les habitants subissent d'une part l'effet des grands axes routiers ou autoroutiers (ring en particulier) et d'autre part le fait que l'habitat en ordre ouvert (maisons ou immeubles 4 façades entourés de jardins) est plus perméable au bruit. C'est donc un paradoxe : ceux qui sont partis habiter loin du centre à la recherche de calme subissent en réalité souvent une gêne plus importante... Cependant, au centre-ville, les places et les espaces verts qui devraient être les zones de calme les plus protégées sont en fait très exposés aux nuisances sonores générées par le trafic routier.

Chaque tissu urbain est caractérisé par sa **perméabilité** acoustique. A grande échelle, le bruit se comporte à peu près comme la lumière. C'est pourquoi les acousticiens parlent couramment "d'ombre sonore" portée par un écran, de phénomènes de réflexion sur des façades voisines, etc. D'autre part, à petite échelle, le bruit se comporte un peu comme un gaz ou un liquide : il pénètre largement les espaces ouverts, mais se trouve arrêté par des brèches de faibles dimensions. Ces deux principes suffisent généralement pour apprécier la perméabilité au bruit d'un plan d'aménagement et juger ses qualités acoustiques.

Sur le plan ci-dessous les façades exposées à un niveau de bruit important ont été représentées par des lignes noires épaisses. On voit qu'il s'agit essentiellement des façades situées le long des voies à fort trafic. La continuité des bâtiments alignés le long de la voie permet d'éviter que le bruit se propage loin à l'intérieur des parcelles.



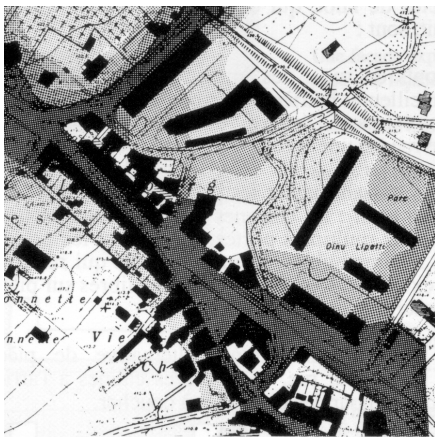
(Plan : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

A Genève, dans les îlots de Montchoisy, conçus par Maurice Braillard en 1929, les angles ouverts diminuent l'étanchéité des formes bâties au bruit mais elles ne laissent pénétrer qu'une faible partie des nuisances, puisque le bruit de la cour est limité entre 50 et 55 dBA, ce qui est légèrement supérieur aux 45 à 50 dBA que l'on rencontrerait si ces îlots étaient fermés. Ces îlots sont représentés en plan et en photo ci-dessous (mesures du Service cantonal d'écotoxicologie, 1980). Sur le plan, les zones les plus foncées correspondent aux niveaux de bruit élevé et les zones les plus claires aux surfaces où le niveau sonore est le plus faible.



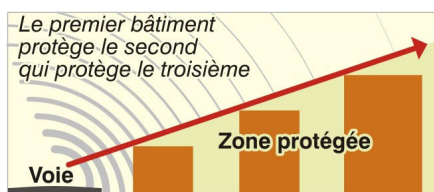
(Plan et photo : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

Dans le plan ci-dessous, une ligne continue des maisons de bas gabarit forme écran contre le bruit de la rue. La hauteur des bâtiments utilisés comme écran n'est donc pas un élément important pour la protection contre le bruit du trafic de l'autre côté de celui-ci. Les mesures ont été réalisées par le Service cantonal d'écotoxicologie en 1980. Les zones les plus foncées correspondent aux niveaux de bruit élevé et les zones les plus claires aux surfaces où le niveau sonore est le plus faible.



(Plan : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

La construction de bâtiments de petite taille, par exemple pour des commerces, des garages ou des industries non polluantes, le long des voies à fort trafic, peut servir d'écran acoustique en offrant le grand avantage de maintenir la rue comme un lieu d'échange convivial et de générer une ombre sonore sur le reste du quartier grâce à une zone de transition vivante.



Il est nécessaire de définir la notion de champ libre et de champ diffus. Le champ libre caractérise un milieu acoustique où le bruit se propage sans rencontrer d'obstacle. L'intensité du bruit y diminue avec l'éloignement de la source. En revanche, dans un champ diffus, le son rencontre des obstacles et se réfléchit sur ceux-ci. Le niveau sonore y dépend davantage de la capacité d'absorption des surfaces que de la distance à la source. En effet, le niveau sonore perçu en champs diffus s'obtient par l'addition du niveau sonore émis par la source initiale et des niveaux sonores des réflexions de ce bruit sur les surfaces environnantes.

Ces deux notions appliquées au tissu urbain permettent de définir les tissus urbains ouverts et fermés acoustiquement. Dans un espace acoustiquement ouvert, plus perméable au bruit, le son émis par une source s'éloigne et se disperse dans l'atmosphère, sans revenir. La distance à la source de bruit et la présence d'écrans acoustiques sont les éléments principaux qui déterminent le niveau sonore d'un espace ouvert. Dans un espace acoustiquement fermé, le son émis par une source est successivement réfléchi ou absorbé par les obstacles (habitations, murs, mobilier urbain,...). Les caractéristiques d'absorption des surfaces d'un espace fermé ont une grande importance pour définir son niveau sonore.

Les rues délimitées sur leurs deux côtés (rues en U) et les cours intérieures de petites dimensions sont des lieux acoustiquement fermés. Tout tissu pavillonnaire, toute zone non bâtie et les rues ouvertes d'un côté vers un large espace dégagé (rues en L) sont considérés comme des espaces ouverts. Certains espaces clos visuellement et protégés du vent peuvent présenter une grande perméabilité au bruit et être de la sorte acoustiquement ouverts; c'est le cas par exemple d'un jardin entouré d'une haie au centre d'un espace dégagé. Les places urbaines et les boulevards sont des espaces semi-ouverts ou semi-fermés pour lesquels les caractéristiques des surfaces ont une influence sur le niveau sonore mais moins que dans les espaces totalement fermés. Les dimensions de ces espaces semi-ouverts jouent sur leur caractère plus ouvert ou plus fermé.

Pour une voie de circulation à trafic identique, à une même distance de la source, le niveau sonore dans une rue en U sera supérieur à celui enregistré dans une rue en L ou un large boulevard. Le tableau ci-dessous donne les résultats de simulations qui comparent les niveaux de bruit moyen pour une rue en L et une rue en U soumises à des niveaux de trafic équivalents, correspondant à une vitesse de circulation de 50 km/h, des voies de 15 m de large en terrain plat et 10% de camions.

Niveau de bruit	Trafic dans une rue en L	Trafic dans une rue en U
50 dBA	600 véhicules /jour	200 véhicules /jour
55 dBA	1000 véhicules /jour	600 véhicules /jour
60 dBA	2000 véhicules /jour	1200 véhicules /jour
65 dBA	6000 véhicules /jour	2000 véhicules /jour
70 dBA	17000 véhicules /jour	7000 véhicules /jour
75 dBA	60000 véhicules /jour	20000 véhicules /jour

La largeur d'une rue en U influence les réflexions acoustiques et donc le niveau sonore qui y est atteint. Au plus la rue est étroite, au plus le bruit est réverbéré. On peut calculer de manière théorique le niveau sonore dans une rue en U par la formule suivante :

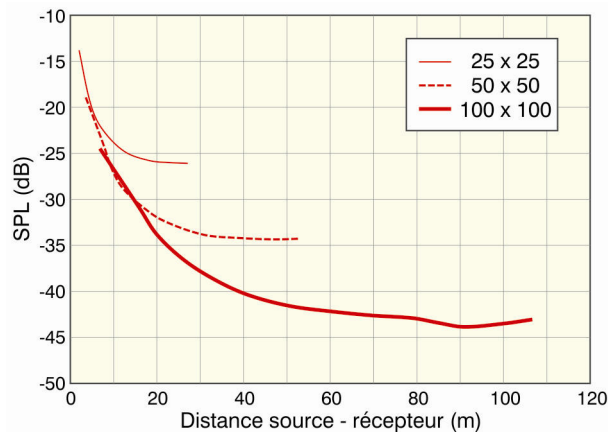
$$L_{aeq} = E - 9.5 \log(W) + 24 \text{ (dBA)}$$

Où E est l'émission sonore d'un tronçon d'infrastructure

W est la distance entre les lignes moyennes des façades (en mètres).

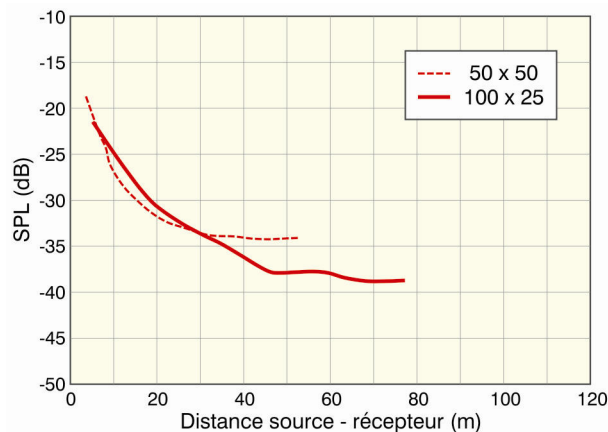
Les effets des dimensions des places urbaines sur leur champ sonore ont été étudiés à l'aide de modèles informatiques développés à l'Université de Sheffield. Des résultats typiques sont résumés ci-dessous et représentés graphiquement, considérant la taille de la place, ses proportions et la hauteur des immeubles (Kang & al. 2004).

Le graphe ci-dessous montre les différences de niveau sonore mesurées dans des espaces de 25m, 50m et 100m de côté pour une distance entre la source et le récepteur croissante, une hauteur des bâtiments de 20m et un coefficient d'absorption des parois de 0.1. Le niveau sonore est exprimé en fonction du paramètre SPL qui correspond au niveau sonore mesuré en un point de l'espace duquel on soustrait le niveau sonore mesuré à la source du bruit.



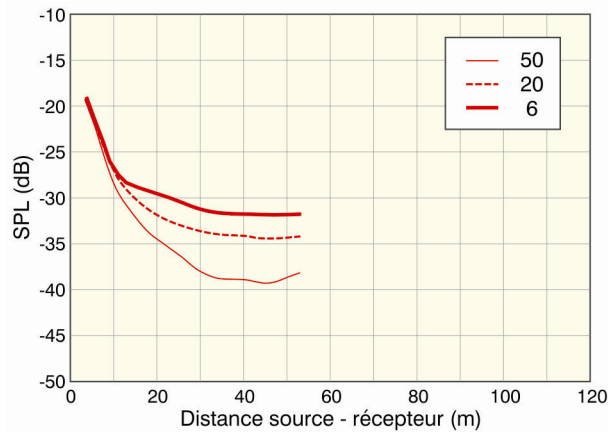
(Kang & al. 2004).

Pour des places de même superficie, la différence entre un carré et un rectangle est représentée par le schéma ci-dessous, pour des places dont la hauteur des bâtiments est de 20m et un coefficient d'absorption des parois de 0.1. L'atténuation du niveau sonore SPL est plus importante dans le champ lointain dans une configuration rectangulaire



(Kang & al. 2004).

Enfin pour une place de 50m x 50m, la variation du SPL en fonction de la hauteur des bâtiments est donnée dans le graphe ci-dessous, pour un coefficient d'absorption des parois de 0.1. Lorsque la hauteur des constructions passe de 6m à 50m de haut, l'écart maximal de niveau sonore est typiquement de 8 dB avec un niveau sonore croissant pour des bâtiments plus élevés.



(Kang & al. 2004).

Les conditions de propagation de l'énergie sonore sont modifiées par les matériaux des surfaces rencontrées. Les éléments constitutifs du tissu urbain possèdent des qualités acoustiques réfléchissantes ou absorbantes variables selon les matériaux utilisés. Notons par exemple que le verre réfléchit davantage les sons qu'un mur en brique. Ainsi, le choix des matériaux influence l'ambiance sonore d'un site.

Le pouvoir absorbant d'un matériau est défini par son coefficient d'absorption. Au plus une paroi absorbe au moins elle réfléchit et inversement. Le coefficient d'absorption α détermine la quantité d'énergie absorbée par une paroi par rapport à la quantité d'énergie incidente : $\alpha = \text{énergie absorbée} / \text{énergie incidente}$. Le tableau ci-dessous donne la valeur du coefficient d'absorption acoustique de divers types de matériaux.

Coefficient d'absorption acoustique α	Caractéristique réfléchissante du matériau	Exemples de matériaux
$\alpha = 0$	Totalement réfléchissant	Plan d'eau, dalle bétonnée, plaques métalliques, bois vernis, marbre, vitrages, ...
$\alpha = 0.2$	Semi-réfléchissant	Bois non poncé et peu jointif, pierres plates régulières, crépi, blocs de béton rugueux, sols revêtus de matériaux bitumineux,...
$\alpha = 0.5$	Semi-absorbant	Bois non jointifs et non poncés, graviers ou matières granuleuses répandues sur le sol, sol en terre avec gazon
$\alpha = 0.7$	Absorbant	Sol naturel très irrégulier comportant une végétation dense

Signalons par exemple que l'utilisation des matériaux réfléchissants améliore la perception de certains sons alors que les matériaux absorbants permettent d'atténuer certains bruits. L'utilisation de matériaux absorbants sur de grandes surfaces permet de transformer un espace urbain fermé en un espace acoustiquement ouvert. En effet, les matériaux absorbants empêchent la réflexion du bruit sur ses parois et donc l'augmentation du niveau sonore dans l'espace due à la superposition du bruit émis et du bruit réfléchi. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un intérieur d'îlot dont l'accès se fait par un porche, l'utilisation de matériaux absorbants sur les murs du porche permet d'atténuer le bruit provenant de la circulation routière. En revanche, dans un parc, sur une place ou à l'intérieur d'un

flot, il est parfois judicieux de placer des matériaux réfléchissants acoustiquement afin de faire ressortir certains sons agréables et utiles (bruit d'une fontaine, de la végétation, des oiseaux,...).



Différents types de matériaux du point de vue acoustique (Photos : S. Reiter).

L'atténuation sonore est plus forte dans le cas des bords diffusants que pour ceux qui sont géométriquement réfléchissants. Notons aussi que la réverbération des sons est beaucoup plus courte sur les places urbaines ayant des bords diffusants que sur celles qui ont des bords réfléchissants (vitrages,...). Ainsi, lorsqu'on veut limiter le niveau sonore d'un espace public et le temps de réverbération des sons dans cet espace, il faut éviter les longues façades réfléchissantes (vitrages,...).

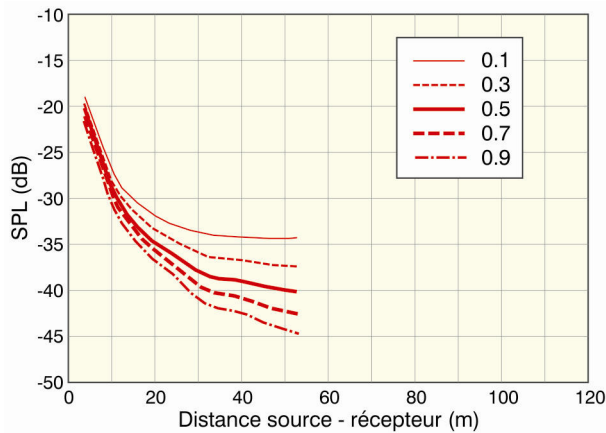


Longues façades réfléchissantes (Photos : S.Reiter).

Le site de Beaulieu à Auderghem s'étend autour de l'axe formé par l'autoroute E411 et la ligne de métro 1A aérienne, deux sources d'importantes nuisances sonores. En 1990, suite à des plaintes d'habitants et à des mesures effectuées par l'IBGE, les nouveaux immeubles « Coddic » ont été identifiés comme responsables de l'accroissement régulier du bruit en façade arrière des habitations situées de l'autre côté de l'autoroute. Ces immeubles, affectés essentiellement aux bureaux, présentaient sur plusieurs étages une façade lisse et très réverbérante qui renvoyait le bruit de l'autoroute par-dessus les murs antibruit qui jusque-là préservaient les riverains (IBGE 1998). Cette expérience prouve que des nuisances sonores indirectes peuvent être liées à des modifications de la morphologie bâtie ou à la construction de nouveaux bâtiments.

Les effets de l'absorption des matériaux des parois d'une place sur le facteur SPL ont été étudiés avec des modèles informatiques développés à l'Université de Sheffield. Le graphe ci-dessous montre la variation du SPL liée à une augmentation

du coefficient d'absorption des bords, pour une place de 50x50m² entourée de bâtiments de 20m de haut. Le SPL diminue proportionnellement à l'augmentation du coefficient d'absorption des bords. La baisse est typiquement de 12 dB quand le coefficient d'absorption des parois augmente de 0.1 à 0.9.



(Kang & al. 2004).

Le champ sonore sur une place urbaine dont les façades et le sol diffusent seulement 20% de l'énergie incidente sur ses bords est très proche de celui résultant d'une surface réfléchissante purement diffuse. Cela signifie que l'effet d'ajouter même une petite quantité de diffusion sur une place urbaine où les réflexions sont principalement spéculaires peut être bénéfique du point de vue de la réduction du bruit urbain. De façon similaire aux bords diffusants, le mobilier de rue, tel que les lampadaires, les bancs, les cabines téléphoniques ou les abribus, peut également être efficaces pour réduire le bruit (Kang & al. 2004).

La végétation sur les façades des immeubles et au sol peut aussi servir à augmenter le caractère diffusant des parois d'un espace public et ainsi augmenter l'absorption sonore dans cet espace, ce qui réduit le bruit. Il est important de noter que l'efficacité de la végétation comme absorbeur dans un espace public urbain (boulevard, place, rue) est beaucoup plus grande que son effet dans espace totalement découvert, à cause des réflexions multiples sur les parois de l'espace urbain. Ainsi, les arbres situés dans des espaces publics urbains y introduisent une absorption sonore et un effet de dispersion du bruit additionnels par rapport à l'effet du sol et des façades (Kang & al. 2004). Il est toutefois important de noter que pour que la végétation ait un effet d'absorption sonore toute l'année, il faut choisir des espèces à feuilles persistantes.



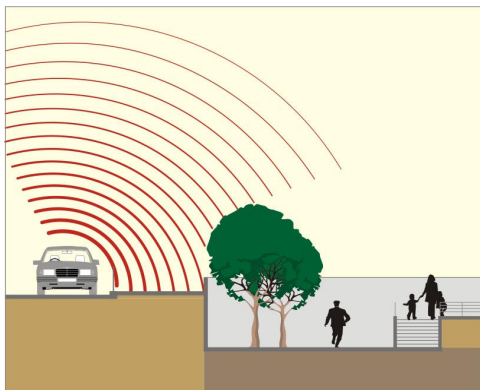
Absorption sonore due à la végétation (Photos : S. Reiter).

La création d'**espaces tampons** entre des ambiances sonores très différentes est utile. Ce sont des espaces intermédiaires entre la source de bruit et l'endroit où le calme est recherché. Ils permettent de faire sentir une progression du bruit entre deux lieux fort différents du point de vue de leur ambiance sonore. Dans cette optique, l'ajout de porches, de cours intermédiaires, de galeries ou d'arcades permet de dévier ou de conduire le son.



Espace tampon (Photo : S. Reiter).

Créer des **différences de niveaux** entre la source de bruit et les espaces de détente est parfois une solution pour isoler un lieu de la pollution sonore de son environnement.



Différence de niveau.

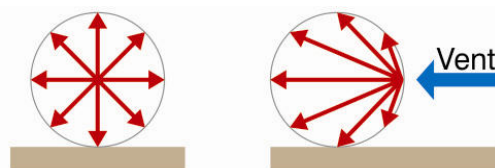
Ainsi, la place Bruegel à Bruxelles est protégée du point de vue acoustique par la dénivellation de 20m de haut qui la sépare de la place Poelaert, fortement exposée au bruit généré par le trafic important sur le boulevard de la toison d'or. Lorsqu'on descend à pied la rampe qui longe le palais de justice, on perçoit aisément qu'on quitte un lieu bruyant où la voiture est reine pour entrer dans une ambiance sonore confortable et à dominance humaine.



Dénivellation importante entre la place Bruegel et la place Poelaert (Photo : S. Reiter).

Les **zones de végétation dense** peuvent aussi servir à isoler un lieu du point de vue acoustique. Dans une rue, la présence de rangées d'arbre ne va pas diminuer le niveau sonore direct qui atteint les piétons mais va limiter la réverbération du son entre les façades grâce à l'absorption du son par les feuilles des arbres. Toutefois, cette réduction sonore due à la végétation peut être fortement renforcée par la présence de zones de plantation dense de l'ordre de 6 à 15m de large entre la source de bruit et le récepteur (Santamouris & Asimakopolous 1996). Dans ce cas, la végétation sert réellement de barrière acoustique et diminue à la fois les champs sonores directs et diffus.

La direction du **vent** modifie la direction de propagation des sons en plein air. Lorsqu'une source sonore se trouve en aval du bâtiment par rapport au sens des vents dominants, la propagation des bruits est diminuée. Lorsqu'elle se trouve en amont, c'est l'inverse. Le dessin ci-dessous montre la modification de la propagation des sons entre une situation sans vent (à gauche) et une situation où le vent souffle de droite à gauche.



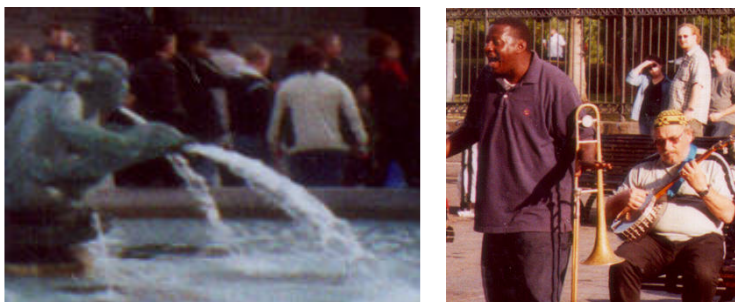
(Roulet 2002)

En milieu dégagé, cette influence du vent sur le son perçu ne devient significative qu'à partir d'une distance de 100m de la source de bruit. Vu la densité des obstacles, en milieu urbain, l'influence du vent sur le niveau sonore peut généralement être négligée.

5.1.3 Les dispositifs de correction acoustique

Les dispositifs de correction acoustique servent à limiter l'inconfort acoustique lorsque les émissions de bruit ne peuvent pas être limitées à la source et que le contexte construit ne peut pas être modifié. Il s'agit essentiellement des **masques sonores** et des **écrans acoustiques**.

L'effet de masque permet de masquer un son que l'on ne veut pas entendre en augmentant le bruit de fond suffisamment pour qu'il masque le bruit parasite ou en limitant le niveau sonore du bruit parasite de manière à ce qu'il soit inférieur au bruit de fond habituel. Un effet de masque peut être créé en couvrant un bruit désagréable par un bruit de même niveau sonore mais plus agréable, comme par exemple une fontaine à fort débit d'eau. L'utilisation d'un masque sonore est à conseiller pour couvrir un bruit de fond qui ne peut pas être supprimé. L'effet de masque peut aussi être utilisé pour choisir un type d'ambiance sonore agréable : lieu à sonorités naturelles, musicales ou autres.



Effets de masque : fontaine et accompagnement musical. (Photos : S. Reiter).

En milieu urbain, dans des espaces collectifs de rencontre, les fontaines sont un moyen efficace pour dissimuler les sons gênants tels que le trafic automobile et créer une ambiance sonore spécifique. Notons que l'effet de masque peut être renforcé si l'on traite la fontaine en matériaux réfléchissants du point de vue acoustique. La végétation peut générer un léger masque contre le bruit routier quand elle est parcourue par le vent et elle ajoute des sonorités agréables à l'ambiance sonore grâce au chant des oiseaux qu'elle attire.



Sonorités naturelles : jets d'eau, branches agitées par le vent, chants d'oiseaux,...
(Photos : S. Reiter)

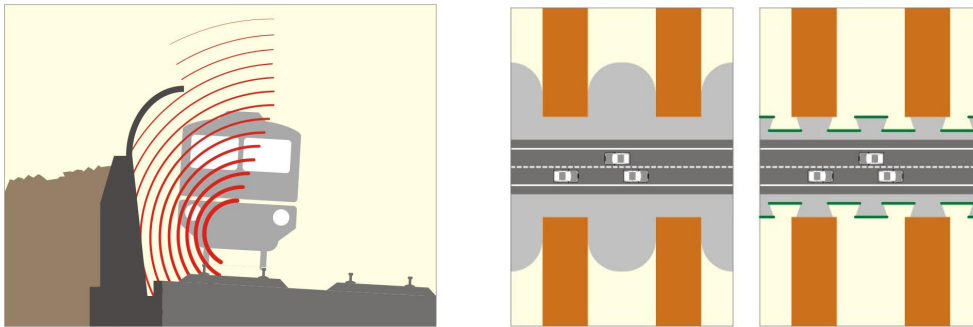
En première approximation, un bruit est masqué par un autre bruit quand son niveau sonore est inférieur de 10 dB(A) par rapport à ce dernier. Mais l'effet de masque dépend en réalité de la fréquence : il est plus vite atteint dans les basses fréquences car l'écart de niveau entre le bruit de fond et le bruit parasite doit être faible pour obtenir un bon effet de masque. Ainsi, utiliser des masques sonores pour cacher le bruit dû au trafic s'avère un moyen très utile pour améliorer le confort acoustique d'un espace public. Le tableau ci-dessous donne les valeurs approchées de l'écart de niveau entre le bruit de fond et un bruit parasite suivant le spectre de fréquences pour obtenir un effet de masque.

Fréquence centrale des octaves du bruit parasite (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Différence entre le bruit de fond et un bruit parasite (dB) pour assurer l'effet de masque	2	6	9	12	13	13

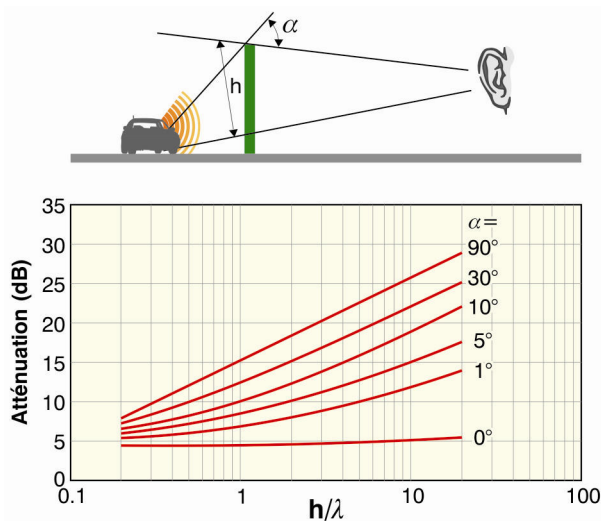
Les **écrans acoustiques** sont des dispositifs techniques dont la fonction première est de limiter la propagation du bruit. La forme des écrans peut être évaluée, en première approche, en assimilant la propagation du bruit à celle de la lumière. Les écrans acoustiques ne doivent en aucun cas être considérés comme une solution universelle aux problèmes acoustiques : ils peuvent améliorer des situations sonores très inconfortables mais ne remplacent ni le travail sur la diminution des sources de bruit ni la conception adaptée d'un aménagement urbain ou territorial de qualité.

La technique des murs pare-bruits est ancienne mais elle s'est développée plus récemment au bord des autoroutes et des voies de chemin de fer. Les murs pare-bruits sont en général mal adaptés aux problèmes rencontrés en milieu urbain, pour des raisons esthétiques et des raisons d'encombrement, mais dans certains cas ils peuvent permettre de corriger les défauts de plans de masse préexistants. Ils peuvent être utilisés pour corriger la mauvaise conception des certaines zones bâties qui sont spécialement vulnérables au bruit, comme par exemples des

ensembles d'immeubles perpendiculaires à des voies de circulation importante ou des lotissements pavillonnaires situés à côté de routes à grand trafic. Les schémas ci-dessous donnent deux exemples de l'utilisation de murs pare-bruit. Le graphe de gauche propose l'implantation d'un mur pare-bruit le long d'une voie ferrée. Les deux graphes de droite montrent la limitation de la propagation des nuisances sonores provenant d'une rue à forte circulation entre des longs bâtiments situés perpendiculairement à la chaussée.

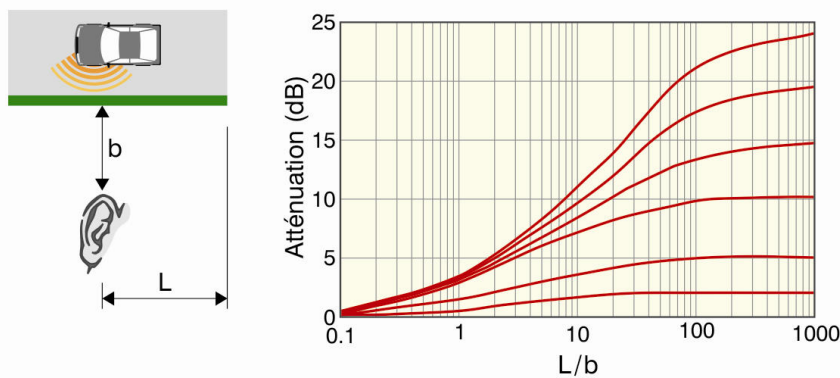


Le schéma ci-dessous donne l'atténuation acoustique d'une paroi infiniment longue. (Roulet 2002).



(Roulet 2002).

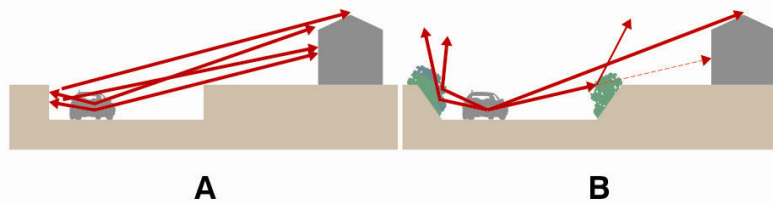
Le graphique ci-dessous montre que l'atténuation acoustique d'une paroi anti-bruit diminue fortement si sa longueur est inférieure à 100 x la distance entre la paroi et le récepteur.



(Roulet 2002).

Pour être efficaces, les écrans acoustiques doivent être continus. Les écrans sont d'autant plus efficaces qu'ils sont pleins. Le bruit qui s'engouffre dans les brèches est d'autant plus intense que les ouvertures sont amples. C'est la raison pour laquelle une rangée d'arbres n'est pas un bon écran acoustique : la réduction du bruit générée par la présence d'une rangée d'arbres est en général inférieure à 2 dBA. Les rideaux d'arbres sont donc de bons écrans visuels mais offrent une réduction acoustique nettement inférieure à un mur. La végétation peut toutefois être utilisée comme écran acoustique à condition que la largeur de la zone plantée soit importante et qu'il s'agisse d'un écran continu en hauteur (petits arbustes et buissons en dessous des arbres,...). D'autre part, la végétation peut agrémenter et embellir les autres systèmes de protection acoustique (murs, talus,...) tout en renforçant leurs capacités d'absorption du bruit.

La création d'une ombre sonore est la meilleure solution pour supprimer le champ sonore direct entre une source de bruit et le récepteur. D'autres systèmes de protection jouent uniquement sur les réflexions sonores ; il s'agit de l'utilisation de matériaux absorbants ou de la présence de surfaces obliques de manière à réfléchir le bruit vers le ciel. Le schéma ci-dessous (Roulet 2002) montre la différence de comportement acoustique entre des tranchées d'autoroute à parois verticales classiques (A) qui causent des réflexions gênantes vers l'habitation et les parois obliques (B) qui renvoient le bruit, atténué par les plantations, vers les ciel. Une solution encore plus performante au niveau acoustique que le schéma B serait la surélévation du talus planté à droite afin d'arrêter (par effet d'ombre sonore) l'ensemble des émissions sonores directes qui se dirigent vers la maison.



(Roulet 2002)

D'autres solutions locales sont à signaler :

- des talus, des terrassements et des différences de niveaux peuvent parfois être avantageusement exploités pour faire obstacle au bruit. Il est généralement conseillé d'y placer de la végétation pour absorber les sons.
- des chicanes ou des portails épais peuvent assurer le passage des personnes et empêcher le passage du bruit ;
- des programmes annexes en bordure de voies (garages, par exemple) peuvent être une bonne manière de créer un ombrage sonore tout en conférant à cette zone une fonctionnalité multiple.
- les vitrages et châssis acoustiques sont utiles pour protéger les bâtiments directement exposés à une source de bruit. Ces bâtiments servent de protection acoustique pour les espaces publics et les bâtiments qui se trouvent du côté de la façade opposée.

Les schémas ci-dessous illustrent ces exemples de dispositifs de correction acoustique.



(Roulet 2002)

Ces dispositifs exercent en général un impact paysager important qui ne doit pas être négligé. Ils spécialisent les espaces, avec comme effet pervers de faire oublier la nécessité de traiter le bruit à la source et de rendre certains lieux inaccessibles aux piétons. Ils transforment ainsi des espaces de coexistence en lieux réservés à un usage spécifique. Ils doivent donc être utilisés en dernier recours lorsque aucune autre solution n'est possible pour réduire la source de bruit et que la pollution sonore qu'elle génère est très importante.

Le tableau ci-dessous compare la réduction sonore possible entre différents types de protections acoustiques.

Type de protection acoustique	Diminution maximale du niveau sonore en dB(A)
Mur pare-bruit	12 à 15
Butte de terre	5 à 10
Ecran utilitaire (parking,...)	5 à 10
Bâtiment de petite dimension	10 à 15

5.2 Méthodes d'évaluation des ambiances sonores

Les méthodes d'évaluation des ambiances sonores sont au nombre de deux :

- les simulations réalisées à partir de logiciels acoustiques.
- les mesures in situ.

Différents logiciels d'acoustique peuvent être utilisés pour l'analyse du paysage sonore dans les espaces urbains ouverts ; citons les logiciels acoustiques MITHRA, Sound Plan, RAYNOISE ou encore le logiciel de cartographie du bruit CADNA. Pour prévoir la propagation du son dans les places urbaines de manière précise, deux modèles informatiques ont été développés à l'Université de Sheffield, l'un basé sur la méthode de la radiosité et l'autre à partir de la méthode image-source (Kang & al. 2004). Le premier est destiné aux surfaces réfléchissantes diffuses (c-à-d., acoustiquement rugueuses) tandis que la deuxième se rapporte aux surfaces géométriquement réfléchissantes (c-à-d. acoustiquement lisses). Ces modèles ont été validés avec des mesures en site réel (Kang & al. 2004).

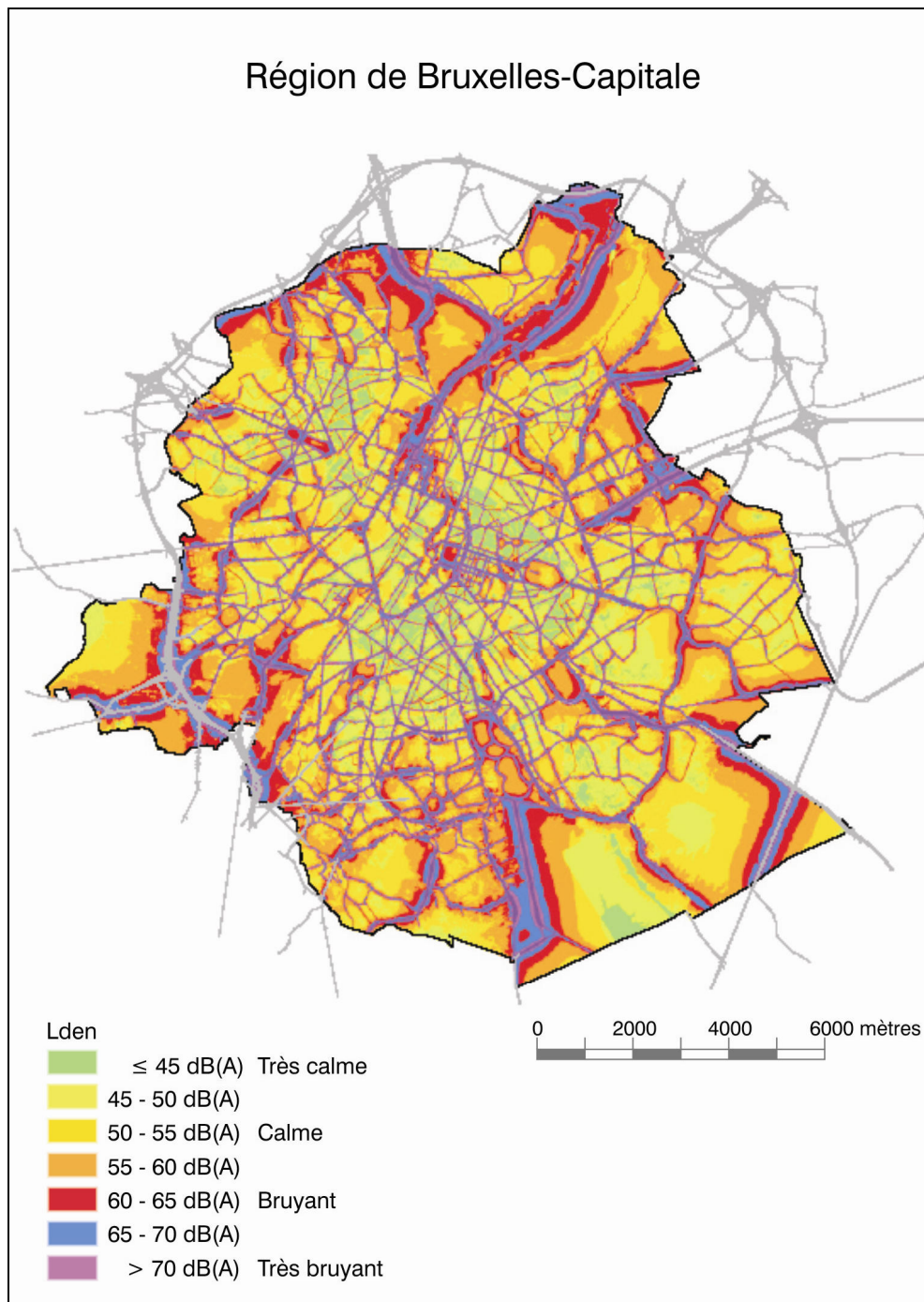
Les mesures in situ restent évidemment la meilleure manière de caractériser le niveau sonore d'un lieu spécifique mais cela nécessite des mesures durant au moins une semaine et la possibilité de placer les instruments de mesure en façade d'un des bâtiments, ce qui n'est pas toujours possible.

A l'heure actuelle, de nombreuses villes se dotent de cartes de bruit, établies à partir d'une combinaison de mesures sur site réel (densité du trafic,...) et de simulations informatiques. Ces cartes sonores sont accessibles au grand public et peuvent donc être utilisées gratuitement par les concepteurs de projets urbains. Ces cartes de bruit donnent le niveau sonore moyen sur les axes principaux de la ville. En général, les niveaux de bruit sont évalués selon l'indicateur Lden (qui consiste en une pondération des moyennes effectuées sur la journée, la soirée et la nuit : day-evening-night).

Au niveau des études acoustiques, la Région de Bruxelles-Capitale donne déjà le ton au niveau européen. Elle compte plusieurs stations de mesure de bruit. Ces stations relèvent en continu les niveaux acoustiques, soit en un point représentatif

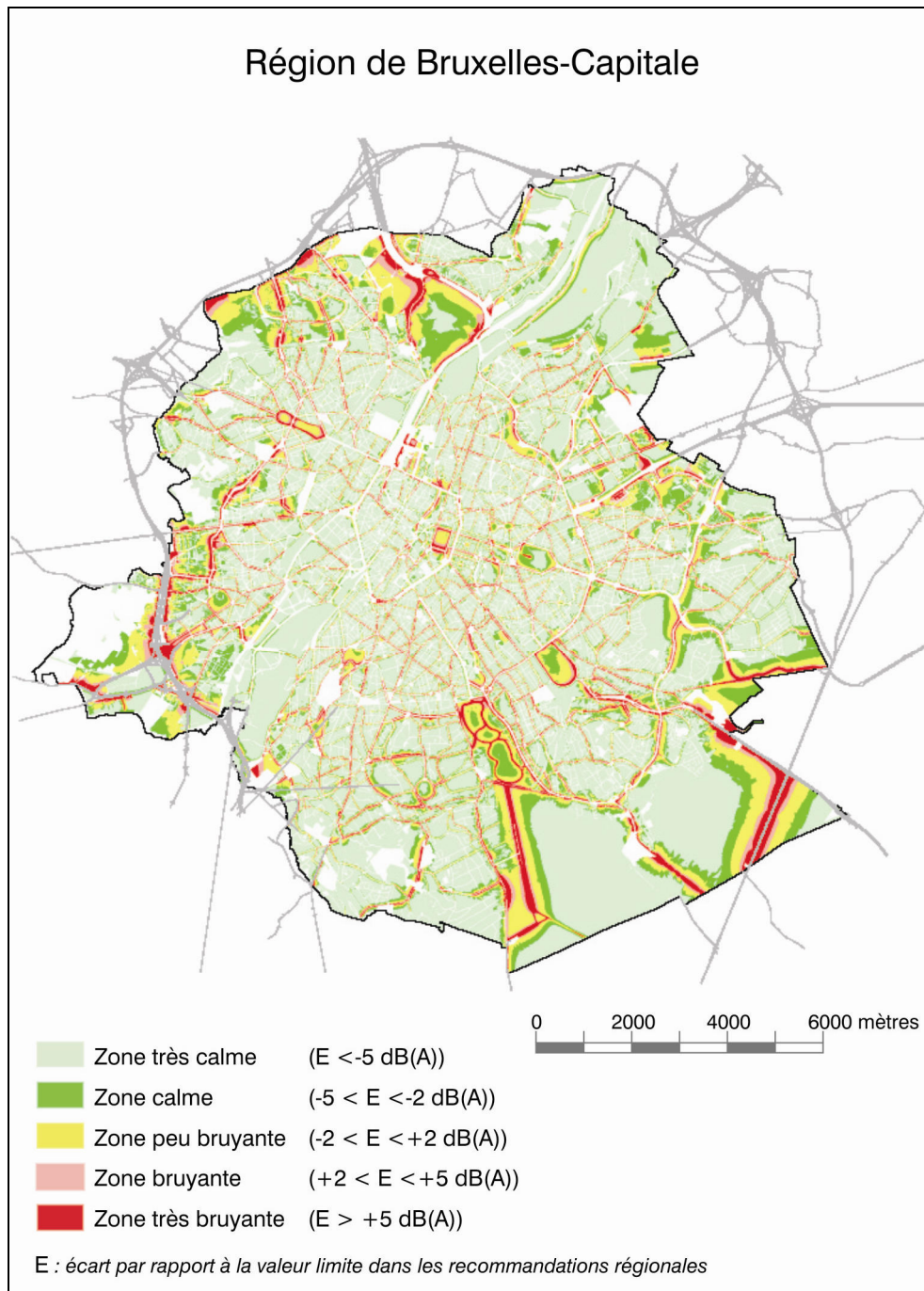
d'une configuration urbanistique donnée soit en vue de la surveillance d'une source sonore spécifique (par exemple le bruit de trafic aérien). Les cartes d'exposition au bruit produites par l'IBGE consistent en une modélisation du bruit routier. Les calculs sont basés sur la forme du bâti, les données de trafic du plan IRIS, des mesures complémentaires de trafic ainsi que des relevés relatifs aux caractéristiques de revêtements routiers.

Le plan ci-dessous est une carte du bruit représentant l'exposition des principaux espaces publics bruxellois au bruit du trafic routier en juillet 2001. (IBGE 2002)



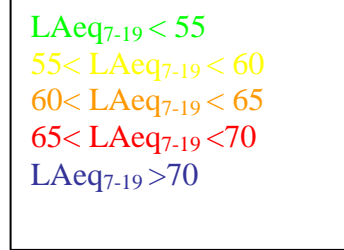
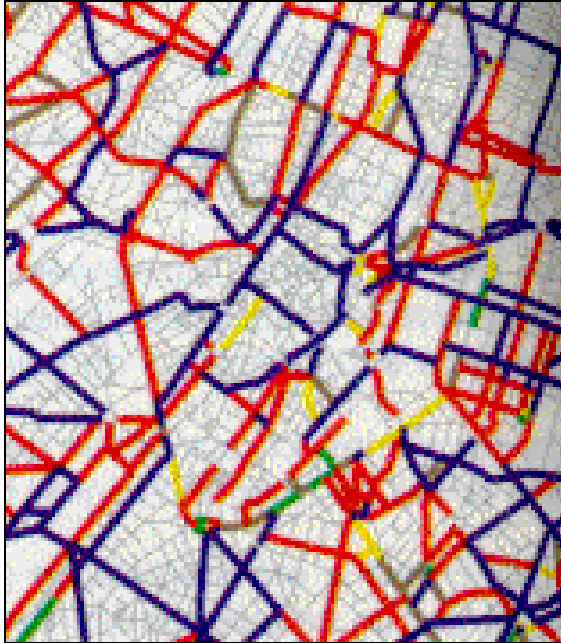
(IBGE 2007)

D'autres types de cartes de bruit existent. Elles représentent par exemple l'écart entre la valeur Lden en un site et des valeurs limites de référence. La carte ci-dessous présente l'écart de dépassement des valeurs Lden par rapport aux recommandations régionales, en juillet 2001 en Région de Bruxelles-Capitale.



(IBGE 2007)

D'autre part, ces cartes peuvent permettre de voir de manière détaillée la répartition des niveaux sonores élevés dans le tissu urbain. Ainsi, l'agrandissement ci-dessous donne une schématisation des niveaux sonores annuels rencontrés dans les rues à fort trafic du centre de Bruxelles entre 7h et 19h. Les rues en gris sont celles pour lequel le niveau sonore n'a pas été modélisé car elles sont en principe considérées comme calmes.



(IBGE 1998)

Il existe enfin une méthode dynamique d'évaluation des ambiances sonores : **la promenade sonore**. Cette méthodologie d'approche de l'environnement sonore urbain est liée au concept de Paysage Sonore qui veut aborder les ambiances sonores d'un point de vue objectif et quantitatif, tout en ne limitant pas l'étude acoustique d'une ambiance sonore à la seule valeur de son niveau sonore moyen.

Ce type de relevé consiste à parcourir un cheminement tout en enregistrant les sons perçus par les deux oreilles du promeneur pour pouvoir ensuite analyser quantitativement et qualitativement en détail les types d'ambiances sonores traversées. La promenade sonore permet d'avoir une représentation instantanée de ce qu'on peut entendre sur un site urbain en fonction des activités qui s'y produisent. Se déroulant sur une période d'une demi-heure environ le long d'un parcours défini par les besoins de l'étude, elle vient en complément des mesures acoustiques standardisées de bruit urbain (en un point situé en façade pendant une durée d'une semaine au minimum).

Nous avons testé cette méthodologie particulièrement intéressante du point de vue de l'analyse des ambiances urbaines sur plusieurs espaces publics bruxellois. Ces expériences scientifiques destinées à étudier la qualité du confort acoustique ont été réalisées avec la collaboration du laboratoire du GRECAU de Bordeaux et plus particulièrement de Catherine Sémidor.

Le mode opératoire est basé sur l'utilisation d'un système d'enregistrement sonore associé avec des prises de vue. Les photographies servent à conserver une trace d'une part des formes urbaines dans lesquelles se fait la promenade et d'autre part du type de sources sonores en présence. Pour le matériel son, Catherine Sémidor a

porté son choix sur un magnétophone DAT équipé d'une "tête artificielle". Le DAT (Digital Audio Tape) est un magnétophone numérique qui permet de réaliser des enregistrements sonores de grande qualité. Le Système d'enregistrement binaural (SEB) est un microphone stéréophonique constitué d'une paire de capsules électret miniatures placées à proximité des oreilles du preneur de son, afin d'utiliser celles-ci comme réflecteurs acoustiques. Ce principe permet donc une captation de l'espace stéréophonique au plus près de l'écoute naturelle. Ses caractéristiques sont telles que l'on peut envisager son utilisation d'un studio d'enregistrement jusqu'à la prise de son à l'extérieur. De plus sa discrétion et sa polyvalence permettent un emploi en toutes circonstances. Les deux microphones du SEB peuvent être calibrés à chaque mesure. Nous pouvons donc de cette façon connaître assez précisément le niveau de pression acoustique des enregistrements sonores réalisés. Il est important de noter que les études acoustiques sont habituellement réalisées à l'aide de microphones omnidirectionnels. Le microphone omnidirectionnel, du fait de sa constitution, mesure simplement la pression acoustique en un point et ne permet donc d'assurer l'effet stéréophonique de l'écoute humaine. Pour cette raison, nous avons choisi le SEB pour des enregistrements sonores en milieu urbain où l'effet stéréophonique nous semble important pour définir les ambiances sonores.

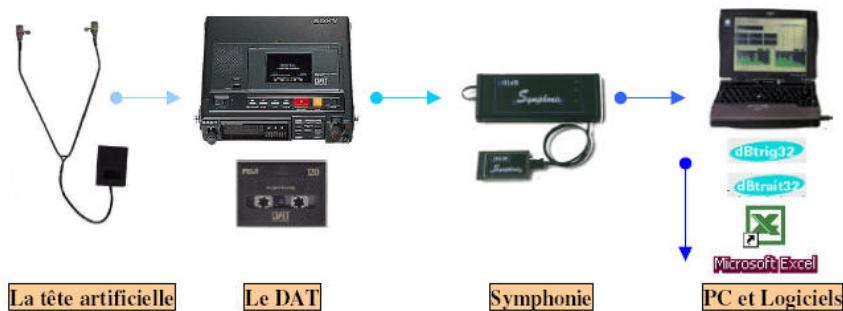


Calibration des microphones
(Photos : S. Reiter)



Déroulement de la promenade sonore

Très souple de mise en œuvre, cette chaîne d'acquisition donne accès à des enregistrements stéréophoniques similaires à l'écoute naturelle binaurale du promeneur. La calibration des bandes magnétiques (couplée avec le repérage de la position de l'atténuateur) permet de dépouiller par la suite en laboratoire chacune des voies grâce à la carte Symphonie associée au logiciel dBEnv. Le schéma ci-dessous montre l'ensemble du dispositif expérimental utilisé pour les promenades sonores (Hamdoun 2004).



(Hamdoun 2004).

Cet équipement offre donc la possibilité de pouvoir analyser séparément et comparer entre eux les signaux sonores captés par les deux oreilles du promeneur (niveaux sonores dynamiques et fréquences des sons perçus par chaque oreille). Cette caractéristique est un avantage indéniable pour pouvoir évaluer l'influence de l'aménagement urbain sur le confort acoustique.

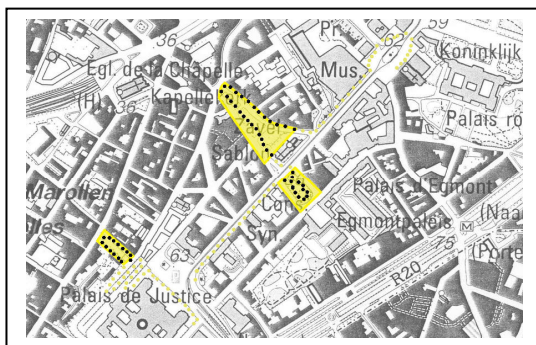
On dispose donc de données chiffrées de l'évolution des niveaux sonores et des fréquences des sons perçus par l'oreille humaine au cours de la promenade. De plus, on possède aussi l'enregistrement de signaux qui peuvent être utilisés dans le cadre d'une enquête, auprès des citoyens par exemple, pour avoir leur opinion sur la qualité du confort sonore urbain.

Les données sont exportées dans un fichier Excel, ce qui permet ensuite d'étudier le niveau sonore en fonction de la fréquence et du temps. Les résultats du dépouillement des enregistrements seront présentés dans cette thèse sous forme d'« images acoustiques » dont l'abscisse représente l'évolution du temps et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté. Ces images synthétisent de manière graphique et très efficace le spectre sonore rencontré sur un parcours déterminé.

Il faut souligner que la promenade sonore est une technique innovante, inventée par le GRECAU, qui nous semble extrêmement porteuse pour l'avenir de la recherche en acoustique urbaine. En effet, la promenade sonore est un outil acoustique qui nous permet des comparaisons aisées en fonction de multiples paramètres, tels que :

- les formes urbaines : rue en U, rue en L, place, parc,...
- le type d'utilisation de l'espace : journée sans voiture ou trafic automobile intense, marché ou journée sans activité particulière,...
- les moyens de transports : tramway, bus, voiture, vélos, piétons.
- les caractéristiques architecturales : formes et matériaux qui réfléchissent ou absorbent les sons.
- ...

Les paragraphes qui suivent présentent les promenades sonores effectuées selon cette démarche en juin 2003 sur trois places de Bruxelles : la place du Grand Sablon, le square du Petit Sablon et la place de l'Épée (rénovée depuis lors et rebaptisée Place Bruegel). Le plan suivant montre la situation de ces espaces publics et les parcours (en pointillés noirs) suivis pour les enregistrements dans ces espaces publics. Les trajets repérés en pointillés jaunes correspondent à des promenades complémentaires réalisées pour avoir un aperçu des ambiances acoustiques dans les voies de circulation qui relient ces trois places entre elles ainsi qu'à la place Poelaert et à la place Royale.



Les promenades ont été effectuées en collaboration avec Catherine Sémidor du GRECAU de Bordeaux. Le dépouillement des enregistrements a été réalisé par Catherine Sémidor. Nous avons réalisé les mesures de niveaux sonores complémentaires sur des durées de 10 minutes à différents moments d'une même semaine ainsi que l'interprétation des images acoustiques.

La promenade de la **place du Grand Sablon** débute depuis la rue de la Régence en laissant l'église Notre Dame des Sablons sur la gauche, se poursuit jusqu'au bas de la place avec un arrêt au niveau de la fontaine avant de remonter par le parking jusqu'à la rue de la Régence toujours en ayant l'église sur la gauche. Cette promenade a débuté le mardi 3 juin 2003 à 11h ; elle a duré 12 minutes. Les photos prises pendant le parcours ont été placées sur le plan de la place afin d'en analyser les éléments significatifs.



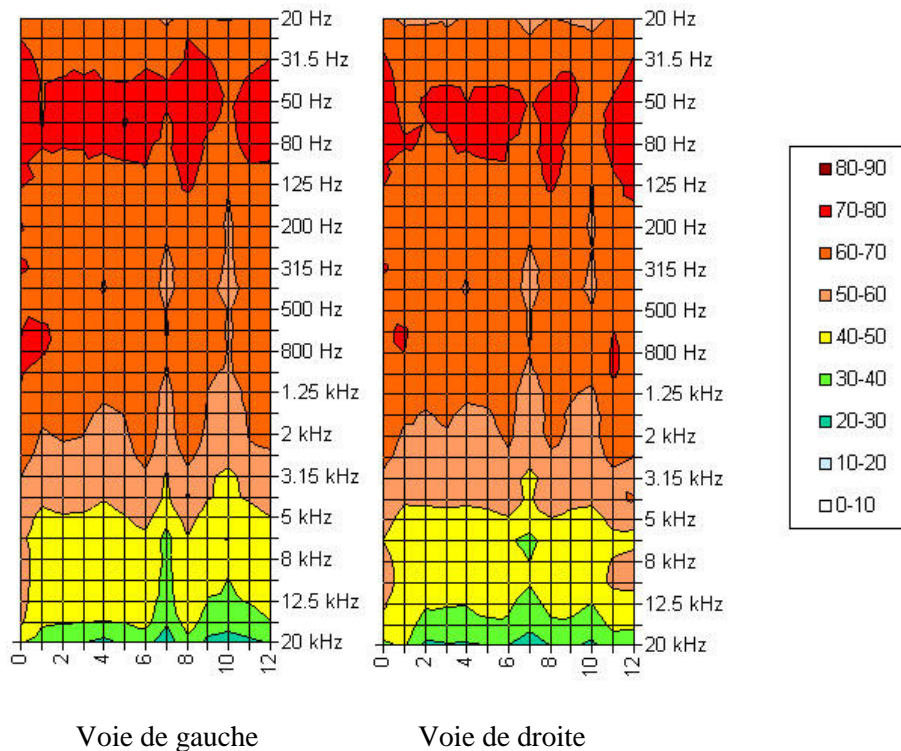
Sens du regard par rapport au plan

La Place du Grand Sablon est une très belle place bruxelloise mais très bruyante et occupée en permanence par un parking. Longée par des voies à fort débit, elle subit le bruit incessant du trafic routier. Cette place, de par ses qualités microclimatiques, historiques et urbanistiques évidentes mériterait un

aménagement intégré de façon à y réduire les nuisances actuelles et y retrouver une zone de calme et de convivialité. Cette place constitue un point de rencontre de différentes fonctions de la ville.

Cependant, malgré les problèmes d'encombrement et d'acoustique importants sur la place du Grand Sablon, cette place est malgré tout fortement fréquentée (terrasses de cafés et de restaurants remplies en permanence en été). Cette place vaut donc réellement la peine d'être réaménagée, d'autant plus qu'elle peut créer encore un lien entre le haut et le bas de la ville (entre le mont des Arts et la connexion place Poelaert – place Bruegel). Son microclimat permet de valoriser un aménagement asymétrique de la place en fonction de la course du soleil.

Le dépouillement des enregistrements est représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



On observe que sur l'ensemble de la promenade le niveau sonore est élevé (de 60 à 70 dB) jusqu'à 2 kHz, avec des valeurs encore plus importantes (jusqu'à 80 dB) dans les fréquences graves ce qui révèle bien un espace où la circulation des véhicules à moteur est importante. Ce caractère est accentué dans le site par le bruit de roulement sur le revêtement en pavé de la chaussée nettement perceptible à l'écoute.

Globalement, la saturation sonore du lieu est confirmée par la très grande ressemblance des signaux perçus par chacune des oreilles. Ceci traduit également une difficulté à pouvoir repérer, sauf émergence très forte, la provenance des sons dans l'espace.

Seul le passage d'un véhicule à côté du promeneur peut ressortir sur le bruit de fond important. On note que les basses fréquences présentent des niveaux sonores un peu plus importants à gauche jusqu'à la neuvième minute, ce qui correspond au fait que la circulation automobile était à la gauche du promeneur pendant toute cette partie de la promenade. Ensuite, le parcours s'est inversé ; le promeneur a traversé le parking et la circulation est alors à droite du promeneur et un peu plus éloignée que dans la première partie du trajet. On remarque à la 11^{ème} minute une légère augmentation du niveau sonore en basse fréquence du côté droit par rapport au côté gauche. Le signal sonore, qui émerge dans les fréquences aiguës sur la voie de droite en fin de parcours, correspond à la musique qui sort d'une voiture attendant dans la file du feu qui permet de rejoindre la rue de la Régence.

Lors de la station de 3mn (à partir de la 6^{ème} mn) effectuée près de la fontaine le relevé au sonomètre IdB donne une valeur de Leq de 68 dBA, ce qui est une situation d'inconfort. Des mesures de niveaux sonores équivalents ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés. La position « Sablon bas » correspond aux bancs situés un peu en dessous de la fontaine et la position « Sablon haut » correspond à un banc situé le long de l'église, sous les arbres.

Lieux	Mercredi 18h	Jeudi 18h	Vendredi 18h	Samedi 12h	Samedi 15h
<i>Sablon : bas</i>	70 dBA	68 dBA	71 dBA	69 dBA	69 dBA
<i>Sablon : haut</i>	60 dBA	62 dBA	61 dBA	59 dBA	60 dBA

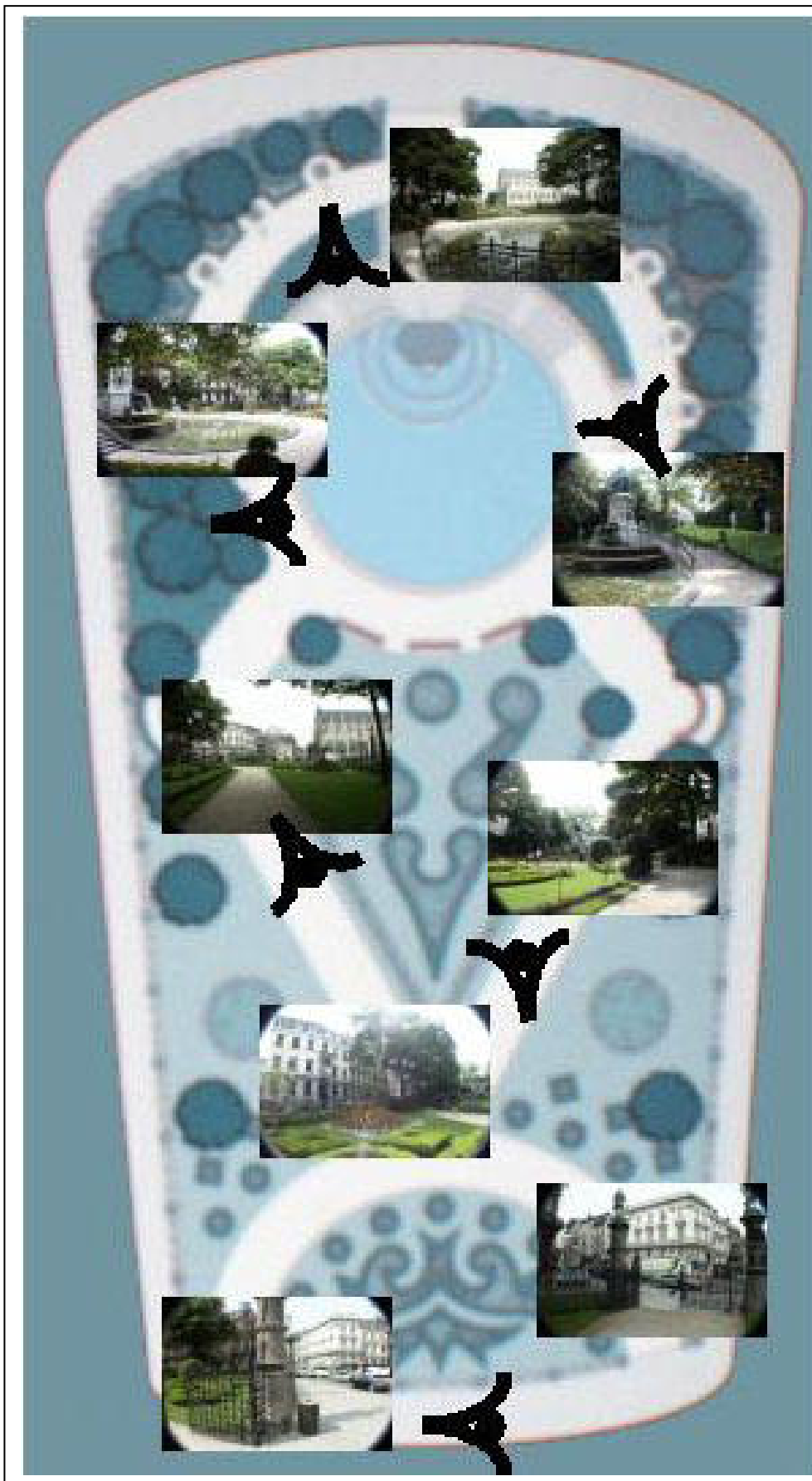
Quelques remarques notées lors des mesures : il faisait chaud à cette période de l'année et le soleil était présent le jeudi et le vendredi. Les échoppes du marché étaient déjà placées mais vides le vendredi et le marché du sablon était en activité le samedi.

Vu les données du tableau ci-dessus, l'intensité de l'enveloppe sonore semble assez constante entre les différents jours de la semaine bien que la présence du marché modifie fortement l'ambiance de la place pendant le week-end.

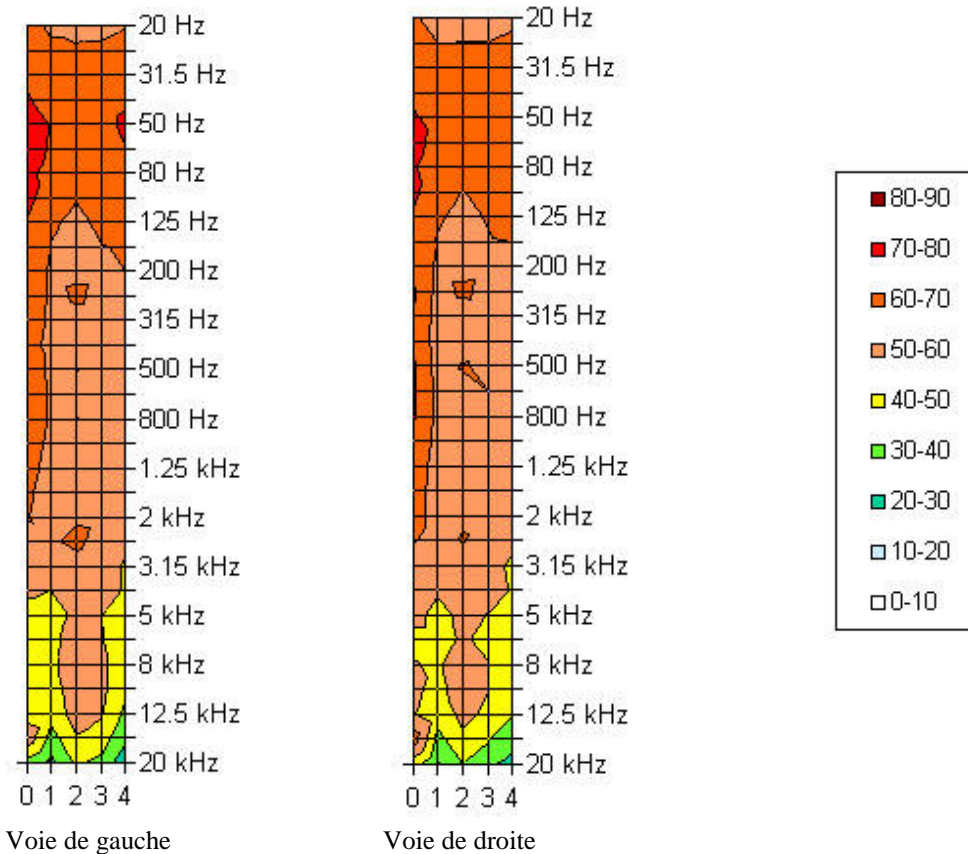
La promenade de la **place du Petit Sablon** débute en entrant par le portail gauche du jardin lorsque qu'on lui fait face. Le promeneur se dirige vers la fontaine, en fait le tour en la laissant sur sa gauche et ressort par le portail droit. Cette promenade s'est déroulée le mardi 3 juin 2003, juste après la promenade du Grand Sablon. Elle a duré 4 minutes.

Il faut signaler que le choix de la place du Grand Sablon et du square du Petit Sablon a été en grande partie déterminé par le désir de trouver deux places très proches l'une de l'autre dont les ambiances acoustiques et climatiques semblaient à première vue très différentes. L'abondance de la végétation et la présence d'une grande fontaine sont des éléments qui donnent une ambiance spécifique au square du Petit Sablon.

Le plan ci-dessous présente en photos le parcours réalisé à travers le square du petit Sablon.



Le dépouillement des enregistrements est à nouveau représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



On repère bien sur les images acoustiques une forte diminution du niveau sonore après une minute de parcours : le bruit de la circulation provenant de la rue de la Régence est filtré par le jardin pour les fréquences graves et médiums.

La marque acoustique de la fontaine est mise en évidence par la modification de la réponse spectrale entre la 1^{ère} et la 3^{ème} minute : le niveau sonore augmente nettement dans les aigus durant le tour du bassin et particulièrement sur l'oreille gauche qui est du côté de l'eau.

L'écoulement de l'eau de la fontaine sert de masque acoustique par rapport aux bruits de la rue. Le bruit engendré par la circulation est très fortement réduit. On remarque cependant l'émergence d'un bruit de freinage de voiture associé au son d'un klaxon à la 2^{ème} minute vers 250 Hz et 2,5 kHz plus marqués sur l'oreille gauche qui est tournée vers la rue de la Régence à cet instant.

Une autre caractéristique de l'ambiance acoustique du petit Sablon est la présence très régulière de morceaux de musique classique répétés par les étudiants du conservatoire qui habitent dans les maisons donnant sur le square. On peut aussi à l'occasion y entendre le chant d'un oiseau.

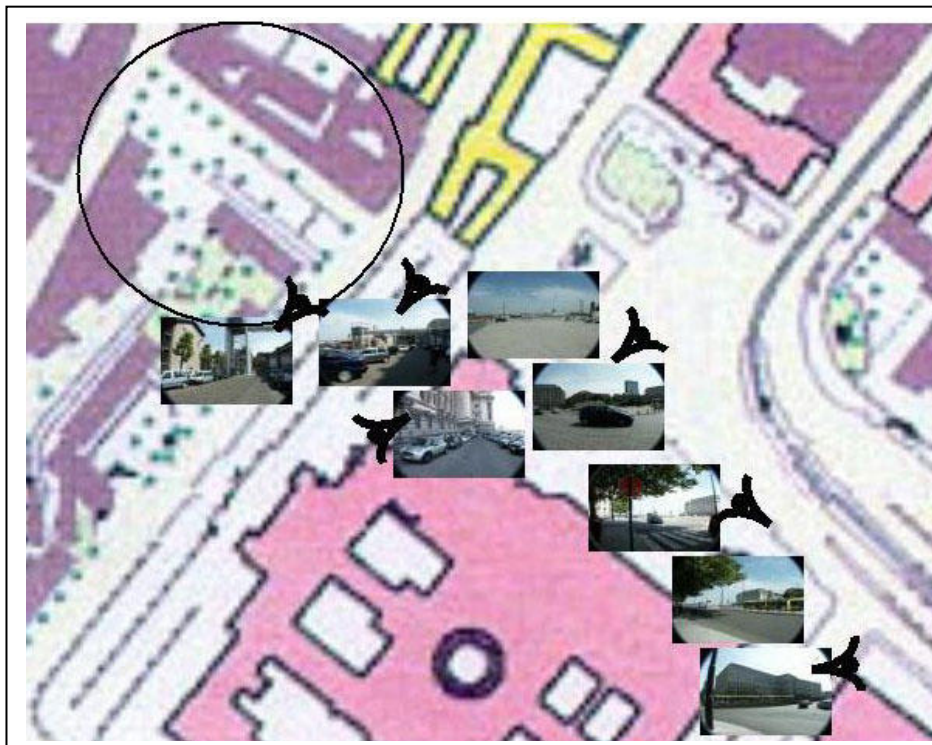
Des mesures de niveaux sonores équivalents ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés dans le square du Petit Sablon, sur un des bancs devant la fontaine.

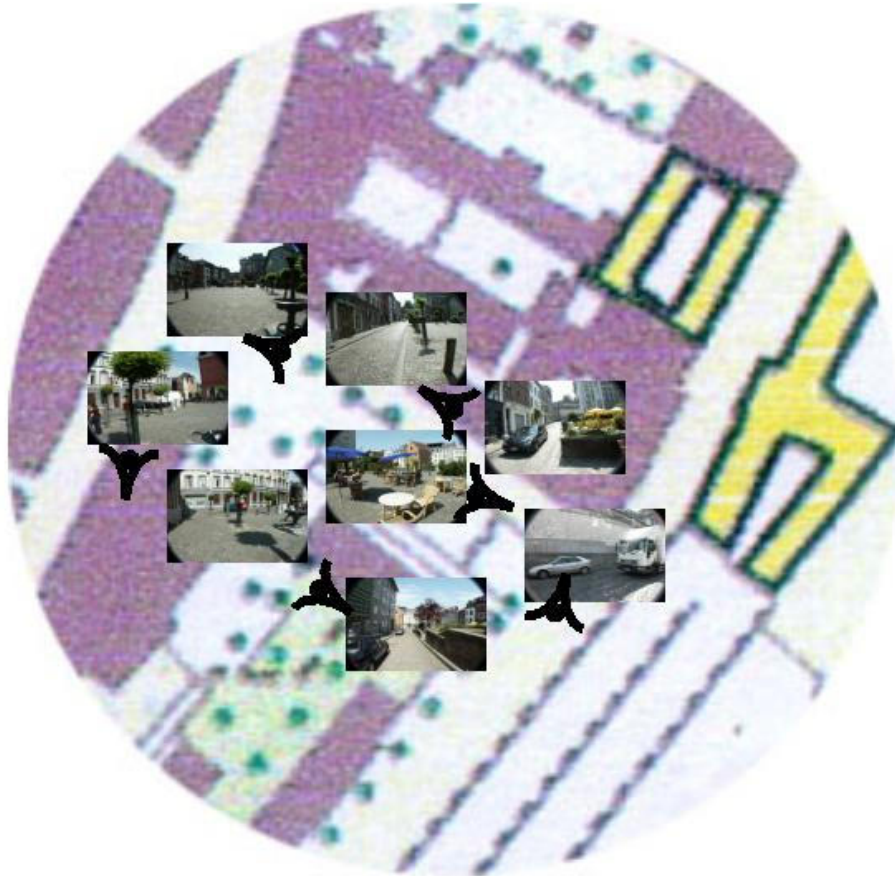
Lieu :	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Samedi
<i>Square sablon</i>	18h	18h	18h	12h	15h
	63 dB(A)	64 dB(A)	64 dB(A)	63 dB(A)	64 dB(A)

Ici aussi, l'intensité de l'enveloppe sonore semble assez constante entre les différents jours de la semaine. Le niveau sonore général est du même ordre de grandeur (mais légèrement plus élevé) que la position sur le banc à côté de l'église de la place du Grand Sablon. Cependant, l'ambiance sonore y est réellement agréable. Ce qui caractérise le paysage sonore dans le jardin n'est donc pas d'être dans un lieu intrinsèquement moins bruyant mais d'entendre d'autres sons que ceux des voitures, des bus, des camions et du tram.

Lors des enregistrements, j'ai noté la présence importante de visiteurs (touristes, familles avec enfants, couples amoureux, personnes promenant leur chien,...) surtout le week-end. Mais l'ambiance sonore reste surtout marquée par le bruit de la fontaine.

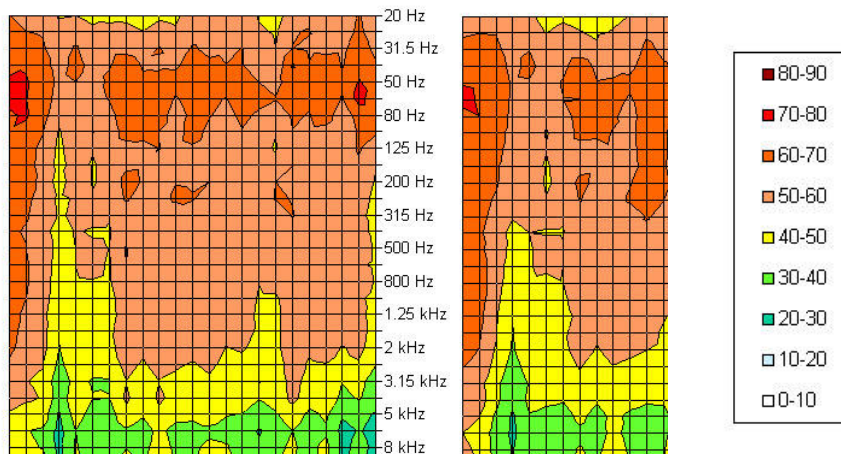
La promenade de la place de l'Épée (rénovée depuis lors et rebaptisée Place Bruegel) débute sur la place Poelaert, descend le long du parking situé derrière le Palais de Justice et rejoint la place de l'Épée en contrebas. Le tour de cette place se fait dans le sens des aiguilles de la montre avec un arrêt en bas de la place et un autre au niveau de la terrasse de café. La promenade a débuté à 11h le vendredi 6 juin 2003. La durée de la promenade est de 20 minutes. La première partie de la promenade est représentée sur le plan ci-dessous avec les photos qui y sont associées. La seconde partie de la promenade est agrandie dans le plan suivant.





Le choix de la place de l'Épée correspond à une place assez proche géographiquement des autres places étudiées mais dont l'exposition à la circulation automobile nous semblait nettement moins importante que celle rencontrée dans la rue de la Régence ou sur place du Grand Sablon. De plus l'influence du dénivelé de 20m entre la place Poelaert et la place de l'Épée nous semblait intéressant à analyser du point de vue acoustique.

Le dépouillement des enregistrements est encore une fois représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



La promenade commence par le tour réalisé sur la place Poelaert. Le début de la descente le long de la rampe du palais de justice correspond à 2 minutes 39 secondes d'écoulées, puis l'arrivée sur la place de l'Épée à 4 minutes 49 secondes. Une station debout de 3 minutes a été réalisées au bas de la place, le long de la rue la plus circulée. La valeur de Leq lue sur le sonomètre IdB est de 63 dBA. A la 11^{ème} minute commence la remontée sur la partie gauche de la place vers la terrasse du café. Une autre station de 3 minutes permet de mesurer un second niveau sonore équivalent de 58 dBA. La promenade se termine en haut de la place au pied de l'ascenseur à la 20^{ème} minute.

Les deux dernières minutes correspondent à l'enregistrement des cloches donnant midi depuis la place Poelaert. Cet élément a été choisi parce qu'il représente à nos yeux un des éléments typiques de l'ambiance sonore du centre de Bruxelles. Le nombre de cloches qui résonnent régulièrement y est assez important et nous semble un élément positif pour l'identification d'une ambiance bruxelloise.

En premier lieu, il est important de signaler que c'est la première promenade sonore où les résultats entre l'oreille gauche et l'oreille droite sont clairement différenciés. Ceci est un élément important car cela signifie que l'audition peut alors être utilisée pour se situer, ce qui participe largement à la création d'une sensation de confort.

Ces images acoustiques permettent de bien mettre en évidence les changements d'ambiances sonores lors des différents passages d'un lieu à un autre. En particulier, dans la descente le long de la rampe du palais de justice, on observe une diminution importante du niveau sonore. En effet, sur la place Poelaert, le niveau sonore du bruit de fond de la ville est important (lié au trafic du boulevard de la Toison d'or). Grâce à sa position en contrebas, le bas de la rampe profite d'une protection acoustique. On montre ici l'influence de la morphologie urbaine sur la qualité acoustique d'un site.

Sur la place de l'Épée les niveaux sonores augmentent légèrement tout en restant à des valeurs qui caractérisent un espace non saturé de bruit, laissant émerger les conversations par exemple, même dans la partie la plus basse qui jouxte une rue circulée. Le confort acoustique est assuré sur l'ensemble de la place et spécialement au niveau des terrasses. La différence importante entre les valeurs globales en Leq relevées au sonomètre à côté de la rue et sur la terrasse (5 dB(A)) sont confirmées par les résultats détaillés. A la hauteur de la terrasse du café située au centre de la place la zone est nettement plus calme qu'au point le plus bas.

Un petit détail est à souligner. A la 13^{ème} minute, la chute d'un couvert depuis la table d'une terrasse est nettement perceptible sur la voie de droite dans les fréquences aiguës. Ce petit incident est bien une preuve que la vie locale sur la place est perceptible au niveau acoustique.

Des mesures de niveaux sonores équivalents supplémentaires ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés en deux endroits de la place de l'Épée. Le point haut correspond à un banc situé dans la partie supérieure gauche de la place et le point bas au point le plus bruyant de l'espace : juste à côté de la rue la plus passante.

Lieux	Mercredi 18h	Jeu-di 18h	Vendredi 18h	Samedi 12h	Samedi 15h
<i>Épée : haut</i>	57	57	59	60	60
<i>Épée : bas</i>	63	62	64	64	61

Le point le plus haut est celui qui est vraiment représentatif de l'ambiance sonore de la place de l'Épée. Lors des mesures, j'ai noté que la place est toujours très appropriée et souvent traversée. Le trafic y est nettement moins important le week-end qu'en semaine. Si le niveau sonore augmente légèrement au point haut le samedi c'est par une augmentation de la fréquentation humaine des terrasses.

Cette première analyse des ambiances sonores de trois places à Bruxelles s'appuie sur des promenades sonores effectuées sur une période unique. Pour affiner ces résultats il faudrait procéder à des promenades additionnelles (périodes différentes dans la journée, dans la semaine et dans l'année) ainsi qu'à des mesures standardisées prises au niveau des façades de ces espaces publics sur une durée d'au moins une semaine. Cette première étude permet néanmoins de dégager le caractère marquant du paysage sonore de chacune des places analysées:

- pour la place du Grand Sablon : le bruit dû à la prégnance de la circulation,
- pour le Petit Sablon : l'identité sonore créée par la présence de la fontaine,
- pour la place de l'Épée : l'ambiance animée d'une place fréquentée avec la possibilité de percevoir une grande variété de sons et la protection acoustique assurée par la dénivellation de 20m entre la place Poelaert et la place de l'Épée.

Les **promenades le long des voies de circulation intense**, que sont la rue de la Régence et la rue Royale, n'ont pas été dépouillées en détail mais on peut toutefois en tirer déjà quelques conclusions de base.

Le long de la rue de la Régence, les niveaux sonores sont élevés. Le bruit des voitures, des bus et des trams sont les seuls éléments reconnaissables.

La promenade réalisée dans la rue Royale longe le parc de Bruxelles ; elle met en évidence le fait que le bruit du trafic couvre toutes les autres sollicitations sonores qui pourraient émerger si ce bruit de circulation continu était plus faible. Ainsi, les événements sonores typiques de la présence d'un parc (chant d'oiseaux, jeux d'enfants, bruissement du vent dans les arbres) pourraient qualifier l'identité du lieu traversé et inviter à s'y arrêter mais ils disparaissent eux aussi dans le trafic urbain. D'autre part, cette promenade supplémentaire permet de comparer l'ambiance sonore d'une rue ouverte (puisque'un des côtés est bordé par le parc) avec celle d'une rue en U équivalente (à savoir la rue de la Régence). La conclusion est évidente dans ce cas : la perception sonore qui devrait être différente entre les deux oreilles pour la rue ouverte est pourtant identique à cause de la prégnance du bruit engendré par les moyens de transport. Ainsi, la lisibilité de la morphologie urbaine est perdue au niveau auditif.

Ces promenades mettent en évidence le problème acoustique que constitue le trafic au-delà même des niveaux sonores élevés engendrés : le bruit de la circulation couvre toutes les autres sollicitations sonores qui pourraient émerger si ce bruit de fond continu était plus faible et uniformise donc l'ambiance sonore de tous les lieux qui y sont confrontés, quelques soient leur morphologie, leur aménagement et leur appropriation.

Dans les cas où le bruit du trafic ne peut pas être diminué, la présence d'une fontaine ou d'une différence de niveau entre la source de bruit principale et l'espace public ont été mis en valeur comme des solutions réalistes pour générer des ambiances acoustiques confortables sur des places urbaines. Il faut bien entendu que le débit de la fontaine et le bruit qu'elle génère soient suffisants pour masquer le bruit de fond. Par ailleurs, la création d'une dénivellation devrait avoir un sens dans le tissu urbain et topographique local au-delà de ses qualités acoustiques.

La participation à ces promenades sonores et leur interprétation confirment la validité et l'intérêt de la méthodologie que nous avons développée dans la partie 2 de cette thèse pour évaluer la qualité des ambiances sonores. Nous nous proposons donc d'analyser un espace public du point de vue acoustique en quatre étapes :

- inventorer les sources de bruit,
- évaluer quantitativement la pollution sonore locale (à l'aide de mesures réalisées selon les normes habituelles ou de simulations informatiques ou d'une consultation des cartes de bruit régionales lorsqu'elles existent) et comparer les niveaux sonores obtenus avec les valeurs limites du confort acoustique et de la santé des piétons,
- évaluer quantitativement la répartition en fréquence des sons dans l'espace considéré à l'aide de promenades sonores réalisées à des moments variés d'une journée et d'une semaine.
- évaluer le ressenti de la qualité sonore d'un espace par l'analyse du lieu public en fonction des critères qualitatifs du confort des ambiances développés dans la partie 2 de cette thèse.

6. Elaboration de règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité

*« L'avenir, il ne suffit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. »
Antoine de Saint-Exupéry.*

Ce huitième chapitre développe un ensemble de règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité. Des exemples illustrent cette stratégie de conception des ambiances urbaines. Cette partie clôture notre recherche sur les ambiances urbaines.

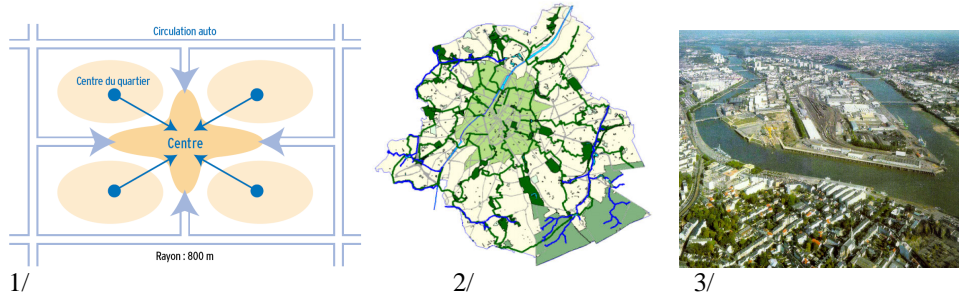
Les règles de bonne conception sont le seul type d'outil qui permet de guider la conception architecturale avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné. Or au niveau du microclimat, les mesures de « restauration » qui portent sur des détails sont nettement moins efficaces que les mesures qui concernent la totalité du bâtiment ou la distribution des masses bâties. Les chapitre 3, 4 et 5 de cette thèse permettent de déterminer des premières règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité.

L'urbanisme microclimatique s'accorde aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible du climat pour assurer des ambiances confortables pour les piétons et limiter les consommations d'énergie des bâtiments. Une bonne utilisation des éléments climatiques et leur intégration harmonieuse aux différents niveaux de la conception procurent un microclimat favorable. Une conception urbanistique qui tient compte du microclimat favorise donc à la fois des espaces publics confortables et des bâtiments qui peuvent tirer profit du climat pour réduire leurs consommations d'énergie. Les formes urbaines anciennes couvraient en général ce savoir microclimatique: modulation de la hauteur des bâtiments, placettes, espaces de transition,.... Puisque les bâtiments ont une durée de vie importante (de plusieurs décennies à plusieurs siècles), les décisions prises au stade de la conception ont des effets à long terme sur l'équilibre énergétique et l'environnement.

Construire avec le climat a souvent pour conséquence de produire une architecture sensible, en accord avec son environnement, à l'échelle du site et de l'homme. **L'urbanisme microclimatique s'inscrit naturellement dans la stratégie du développement durable.**

Notre stratégie des ambiances urbaines est développée ci-dessous en un ensemble de principes d'intervention formant un canevas pour les actions futures. Nous allons définir des règles de conception urbaine aux deux niveaux d'action de la conception urbanistique. Le premier niveau est celui de la planification urbaine, où la conception est réalisée à l'échelle de la ville entière. Le deuxième niveau est la morphologie urbaine, où la conception est appliquée à un groupe de bâtiments et les espaces qui les séparent.

Les illustrations ci-dessous montrent un projet de conception, un projet de rénovation et un projet de reconstruction partielle au niveau de la planification urbaine.



- 1/ 1= Projet de conception d'une ville nouvelle : Louvain-la-Neuve, schéma simplifié.
 2/ 2= Projet de gestion d'une ville existante : plan des maillages vert et bleu de la Région de Bruxelles-Capitale.(Plan : IBGE 2002).
 3/ 3= Planification urbaine : création d'un nouveau quartier au cœur de la ville de Nantes.(Photo : Escudero 2004).

Les illustrations ci-dessous montrent un projet de conception, un projet de rénovation et un projet de reconstruction partielle au niveau de la morphologie urbaine.



- 1/ 1= Conception d'une place urbaine contemporaine : la place des Sciences à Louvain-la-Neuve. (Photo : S. Reiter).
 2/ 2= Rénovation de la place d'armes à Namur. (Photo : J.-M. Gillon)
 3/ 3=Inscription d'un bâtiment contemporain sur une place existante : hôtel de ville à Murcia.(Photo : El Croquis n°98, 1999)

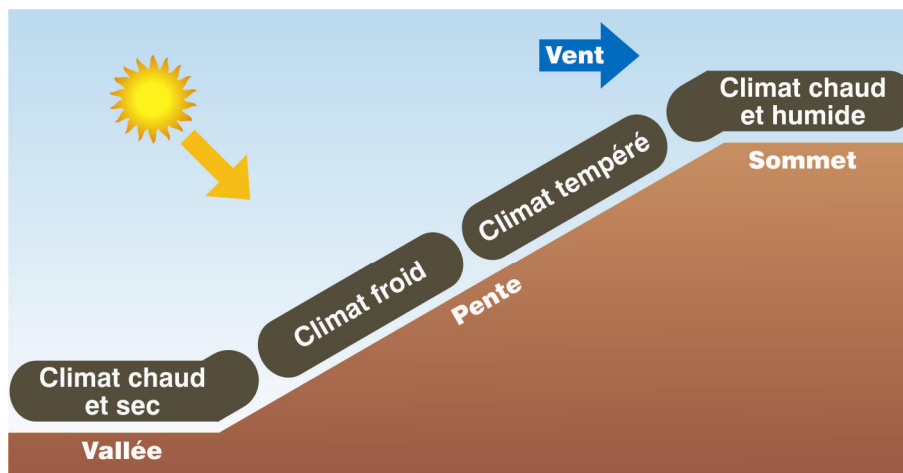
6.1 La planification urbaine

Au niveau de la planification urbaine, les quatre éléments de composition essentiels à cette échelle sont l'implantation du projet, la densité construite, les moyens de transport utilisés et la répartition des zones d'espaces verts.

Lors de la création d'un nouvel ensemble urbain, il y a lieu de choisir le terrain idéal d'un point de vue microclimatique dans le but d'offrir un bon confort aux piétons dans les espaces publics et de limiter les consommations d'énergie des bâtiments.

Il faut choisir la localisation privilégiée d'une zone bâtie en fonction du climat. Par exemple, sa position idéale par rapport à la topographie dépend de la zone climatique:

- en climat froid : l'idéal est une situation relativement basse sur une pente orientée au sud pour accroître le rayonnement solaire et être protégé du vent sans être refroidi par l'accumulation d'air froid dans la vallée.
- en climat tempéré : il faut se placer dans la partie moyenne à supérieure de la pente pour maximiser l'exposition au soleil et la possibilité d'une ventilation naturelle, tout en se protégeant des vents les plus forts.
- en climat chaud et aride : il faut se placer au pied d'une pente orientée vers l'est, pour profiter de l'air frais qui s'y accumule la nuit et limiter le rayonnement solaire durant l'après-midi.
- en climat chaud et humide : il faut se placer au sommet d'une pente pour profiter de la puissance maximale du vent à cet endroit ou sur la partie supérieure d'une pente orientée dans le sens des vents dominants ou éventuellement d'une pente orientée vers l'est pour diminuer l'ensoleillement d'après-midi tout en profitant tout de même du vent.



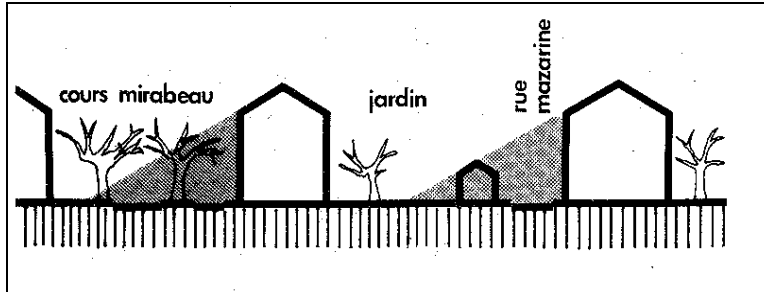
Position idéale d'une zone bâtie en fonction du climat

Ainsi, il est utile de choisir une topographie favorable du point de vue microclimatique pour y implanter un nouveau quartier ou une nouvelle ville. En Belgique, on placera de préférence les zones bâties suffisamment haut à flanc de colline pour bénéficier du soleil même en hiver.

L'éclairement d'un site en pente dépend de l'orientation et de l'inclinaison du terrain. Les pentes orientées vers l'est offrent de beaux levers de soleil et sa disparition rapide dans la soirée; les versants ouest montrent de superbes couchers mais un soleil qui se lève tard; le creux de la vallée reçoit une période d'ensoleillement direct plus courte que le sommet. Les pentes sud jouissent d'une meilleure insolation que les terrains plats. Il faut prendre en compte les caractéristiques naturelles du site et tirer profit du profil du terrain. Les bâtiments qui sont situés sur une pente orientée vers le sud peuvent être rapprochés les uns des autres par rapport à un terrain plat pour obtenir le même accès au soleil dans l'espace public. Inversement, une pente orientée au nord induit une perte d'ensoleillement surtout pour les latitudes élevées. Ainsi, les pentes fortes orientées vers le nord doivent à tout prix être évitées si on désire profiter de la lumière solaire dans les espaces publics.

Le « droit au soleil » soulève toujours la crainte au sujet du devenir des densités d'occupation du sol. Pourtant, le passé nous fournit des exemples de qualité de zones urbaines denses et bien conçues pour profiter d'un ensoleillement maximal. Dans l'urbanisme spontané, nous pouvons citer de nombreux villages du midi

Les rues principales sont parallèles au Cours Mirabeau (rue Mazarine, rue Goyrand, rue Cardinale...). Les constructions situées sur leur côté Sud sont hautes et ont leur façade principale sur le côté jardin, au Sud. Du côté nord, on ne trouve que des constructions basses qui sont en fait des dépendances et qui sont plongées dans l'ombre, sans conséquence puisqu'en principe inoccupées. Le schéma ci-dessous montre la coupe du quartier des Quatre Dauphins à Aix-en-Provence.



(Izard & Guyot 1979)

Les rues qui les recoupent perpendiculairement (rue Laroque, Cabassol, F-Mistral...) ne sont en général pas bordées d'immeubles, à l'exception des façades pignons des immeubles déjà cités. Bien entendu, les jardins sont plantés d'arbres à feuilles caduques (des platanes en général). Les photos ci-dessous montrent des vues typiques des zones bordées de jardins.



(Photos : S. Reiter)

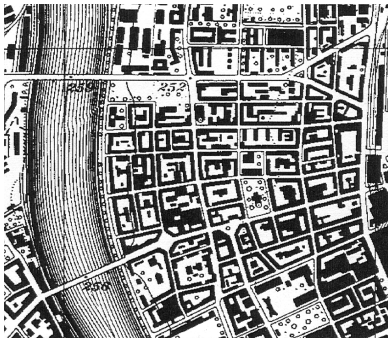
Lors du choix de l'emplacement de la ville de Louvain-la-Neuve, les données climatiques n'ont pas été prises en compte. Aussi non, le site aurait sans doute été écarté pour sa très forte exposition aux vents, ce qui explique que le lieu était vierge d'urbanisation et que même les cultures donnaient un mauvais rendement. Cependant, il faut admettre que globalement la ville est bien organisée pour se protéger des vents dominants et que la plupart des ruelles et places sont fort agréables à fréquenter grâce à l'effet de masque urbain.

Les choix urbanistiques de base influencent fortement la capacité des villes à disperser la pollution produite. Certaines villes, comme Mexico ou Athènes sont célèbres pour leurs taux de pollution : encaissées dans une dépression, à l'écart des grands vents, tous les sous-produits de l'activité humaine s'y accumulent en quantités dangereuses sous forme solide, liquide et gazeuse. Les enjeux liés à la santé et au confort des citoyens y deviennent aigus.

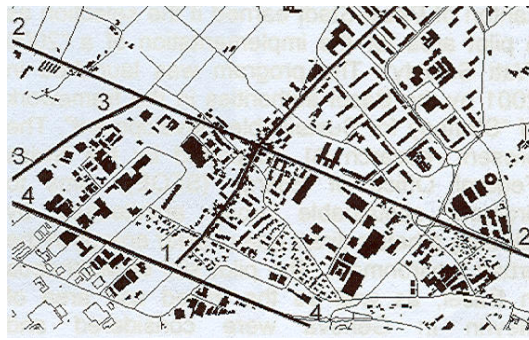
Les industries polluantes doivent toujours être placées sous le vent de la ville par rapport aux vents dominants, ainsi que toutes les infrastructures bruyantes telles que les aéroports, champ de courses automobiles, ...

Il est indispensable de concevoir des urbanisations suffisamment denses pour limiter la surconsommation d'espace et conserver des zones naturelles en dehors de nos villes. De plus une planification urbaine relativement dense est la configuration urbaine la plus favorable pour limiter les consommations d'énergie (bâtiments, transport,...)

Les deux plans ci-dessous représentent à gauche le quartier matthaeus de la ville de Bâle et à droite le quartier Meyrin de la ville de Genève, tous deux situés en Suisse.



Bâle : quartier Matthaeus
(Plans : Montavon & al. 2004).



Genève : quartier Meyrin

Les tableaux ci-dessous permettent de comparer l'utilisation du sol de ces deux quartiers (Montavon & al. 2004).

Quartier (ville)	Matthaeus (Bâle)	Meyrin (Genève)
Morphologie urbaine	Ilots urbains. Toits inclinés.	Barres et blocs isolés. Toits plats.
Hauteur moyenne des bâtiments	15m (Rez+4 étages)	30m (Rez + 10 étages)
Superficie du quartier	59 hectares	998 hectares
Nombre d'habitants	15 300 habitants	20 500 habitants
Densité de la population	259.1 hab./hectare	20.6 hab./hectare
Nombre d'habitants par logement	1.96	2.3
Surface habitable par personne	32 m ²	35m ²
Année de construction	66% avant 1945	70% après 1960

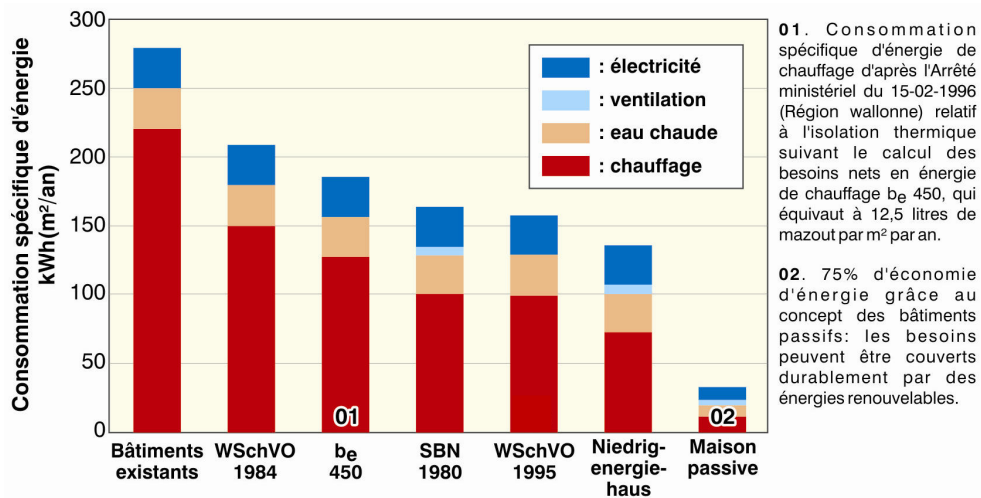
On voit donc que le quartier traditionnel construit à partir d'îlots urbains consomme dix fois moins d'espace que le quartier moderniste, alors que la surface habitable par personne est pratiquement la même. Considérons même que le quartier traditionnel de Bâle offre désormais une surface habitable par personne exactement équivalente au quartier Meyrin de Genève (35m²/habitant), la densité de la population serait encore de 236.89 habitants/hectare, ce qui correspond à 11.5 fois le nombre d'habitants par hectare de Meyrin pour une même surface habitable par habitant !

Tant que l'angle d'obstruction solaire moyen reste inférieur à 30°, la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel situé en ville est plus faible que celle d'un bâtiment isolé en site totalement dégagé. Par contre, si l'angle

d'obstruction solaire moyen dépasse les 30°, la consommation énergétique des bâtiments sera supérieure dans le cas urbain (Steevers 2003). Pour des bâtiments en îlots de 10m de large, un angle d'obstruction de 30° correspond à une densité de l'ordre de 200 logements par hectare, pour une surface habitable de 125 m² par logement, ce qui est énorme.

En plus de limiter les consommations d'énergie des bâtiments, un tissu urbain dense favorise le potentiel d'utilisation des modes de transport écologique. En outre, une utilisation plus intense du territoire et un partage des infrastructures (énergie, eau, drainage, rues, bâtiments, transport public) réduit l'énergie associée à sa construction et à sa maintenance. Ainsi, il est préférable de favoriser la densification des friches urbaines, plutôt que de créer des lotissements en zone rurale. Le concept de constructions à haute densité horizontale présente des avantages réels au plan du confort des personnes et de la consommation d'énergie par habitant, tout en étant moins consommateur d'espace et d'un coût de réalisation moins élevé que les constructions en hauteur ou l'habitat dispersé. Au plan social, la construction basse de haute densité constitue un cadre physique favorable aux contacts informels, à la convivialité et à l'appropriation des espaces publics urbains.

Signalons également que les performances énergétiques du bâti s'améliorent régulièrement. Par conséquent, les infrastructures sont destinées à prendre une importance croissante dans le bilan environnemental global. A titre de comparaison, le graphe et le tableau suivant indiquent les consommations d'énergie [kWh] par m² et par an pour les bâtiments existants (non isolés), les bâtiments répondant aux exigences belges du K55 ou du Be 450 (1996) et pour le standard de la 'maison passive'.



Bâtiment non isolé	Bâtiment K55-Be450	Maison passive
250 kWh/m ² .an	150	25
25 l/m ² .an	15	2,5

Se concentrer sur la consommation des bâtiments à l'exclusion de leur construction et des infrastructures est donc du point de vue environnemental erroné à terme : les réseaux de desserte ne peuvent être négligés. La densité de l'habitat joue toujours un rôle de premier plan dans le bilan global d'une urbanisation.

La densité urbaine et son exploitation sont des critères importants dans l'évaluation des émissions polluantes en milieu urbain car ils influencent non seulement les consommations d'énergie des bâtiments (mitoyens,...) mais aussi celles dues au transport (opportunité d'utiliser des moyens de transport en commun, proximité des activités autour du domicile, ...). Ainsi, différentes études ont porté sur le rapport entre la densité de la population urbaine et les émissions de CO₂ dues au transport routier. Elles arrivent toutes à la même conclusion que la densité d'une ville est un facteur important de la réduction des consommations d'énergie. Ces études montrent aussi que la diminution des dépenses d'énergie par habitant grâce à l'augmentation de la densité est très rentable pour une densité équivalente aux centres urbains européens traditionnels mais qu'elle devient minime pour des densités telles que celles de Hong Kong qui créent par ailleurs de nombreux désagréments locaux et vraisemblablement des surconsommations au niveau des bâtiments.

Encourager la construction de nouveaux logements à haute efficacité énergétique en dehors des centres, par exemple, risque de favoriser la désurbanisation et donc, de générer un accroissement des déplacements en voiture vers les lieux d'emploi réduisant les effets durables attendus. C'est en fonction d'un bilan global intégrant les dimensions économiques, sociales, culturelles et environnementales que l'on doit opter pour tel ou tel ensemble de mesures urbanistiques.

Les études de la CPDT (2002) ont montré quels étaient les paramètres qui affectent le coût d'une désurbanisation latente. Parmi ceux-ci, la consommation d'espace par l'urbanisation peu structurée, la dédensification urbaine et la monofonctionnalité de certaines zones sont clairement pointées comme causes de coûts collectifs importants et d'impacts environnementaux négatifs.

De manière générale, pour limiter les consommations d'énergie d'un quartier, il est nécessaire de favoriser la densité du bâti et de densifier de préférence les zones situées près des infrastructures de transport en commun, d'assurer une concentration des activités humaines (habitat, travail, activités récréatives), de prévoir des transports en commun efficaces, d'offrir une abondance d'espaces publics confortables et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo, de créer un microclimat urbain qui limite les besoins énergétiques de chauffage, d'éclairage et de refroidissement des bâtiments, tout en assurant le confort des habitants.

Une densité d'environ 100 personnes par hectare est recommandée en Grande Bretagne sur la base de:

- la densité nécessaire pour supporter un bon service de bus.
- la densité minimale viable pour un système de chauffage du district.
- la densité maximale pour un accès solaire abondant.

Par comparaison, signalons que la densité moyenne de Bruxelles, ville très verte mais assez compacte, est de 72.5 habitants par hectare.

Quand on parle de densifier notre habitat, il s'agit d'aller contre la tendance européenne actuelle à l'étalement des constructions à travers tout notre paysage. Pour combattre le phénomène de désurbanisation et le départ en périphérie non seulement des habitants mais aussi de nombreuses fonctions urbaines, entraînant une paupérisation du cadre bâti et des populations résidentes au cœur des villes, il faut envisager :

- de stabiliser la présence de la fonction résidentielle dans les parties les plus centrales et les plus denses de la ville,
- de densifier l'habitat dans les périphéries les plus proches (parcelles inoccupées, intérieurs d'îlots surdimensionnés,...), les espaces urbains abandonnés (friches urbaines, sites d'activité économique désaffectés, ...) et autour des connections de lignes de transport en commun.
- de concevoir des espaces publics de qualité tant à l'échelle de la ville qu'à celle du quartier.

Il est judicieux d'être attentif à la présence dans chaque quartier de diverses activités ouvertes au public et créatrices d'animation, y compris en soirée. Pour construire une urbanité, il est indispensable de développer la coexistence des groupes sociaux, des cultures, des langages, des religions, des âges et des activités. La diversité recherchée peut être favorisée par une diversité de la forme urbaine : mixité du type de logements proposés (par exemple entre petits collectifs et maisons individuelles accolées), formes architecturales variées (traitement coloré des façades, variété des matériaux utilisés...), ... Ces éléments ont une implication directe sur la mixité des fonctions, l'équilibre emploi-habitat et la mixité sociale et générationnelle des habitants.

Il est important de souligner qu'en Belgique les contraintes imposées aux promoteurs pour un aménagement du territoire durable sont encore trop timides.... Des incitations politiques et financières doivent être adoptées, par exemple pour limiter l'aménagement de terrains vierges. Voici quelques actions à mener d'urgence dans le but de réaliser un aménagement urbain durable:

- afficher et définir une politique forte de développement durable dans les documents d'urbanisme ou à travers des procédures volontaires de type Agenda 21.
- privilégier la reconversion des friches urbaines à la création de quartiers neufs sur des espaces agricoles ou naturels ;
- planifier les infrastructures de transport, d'équipements et de services dès le démarrage du projet.

Il est également important de prévoir des transports en commun efficaces ainsi que d'offrir une abondance d'espaces publics de rencontre et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo. Signalons encore que si des mesures drastiques de diminution des voitures étaient réellement appliquées dans nos villes nous pourrions redessiner nos espaces publics totalement différemment. Nos petits trottoirs et nos pistes cyclables en bord de route pourraient retrouver des dimensions convenables.



(Photo : S. Reiter).

Les mesures suivantes sont importantes pour favoriser une politique de valorisation des modes de transport plus écologiques que la voiture individuelle :

- la planification et le développement, très en amont du projet d'urbanisation, des transports publics. Les arrêts devraient être distants de 300 et 700 mètres maximum des commerces et des services.
- la création de sites propres ou de rues réservées aux transports publics.
- la réduction du nombre de places de stationnement de voitures dans les quartiers.
- la limitation de la vitesse de circulation automobile à l'intérieur des quartiers.
- la création d'axes piétons et de pistes cyclables, agréables et bien éclairés, reliant les différents quartiers et zones urbanisées.
- l'aménagement de nombreux parkings pour vélos.

Pour favoriser le confort en ville, il est indispensable d'offrir un grand nombre d'espaces publics de rencontre. Il faut fournir des surfaces d'espaces verts suffisantes et une bonne répartition de ces zones végétales à travers le milieu urbain. La Commission Européenne suggère d'utiliser comme indicateur de la qualité de l'environnement urbain la distance de 15 minutes de marche ou moins de toute habitation à un espace vert. A Bruxelles, Copenhague et Glasgow, l'ensemble des citoyens peuvent accéder à un espace vert en 15 minutes. Dans beaucoup de villes européennes ce critère est toutefois loin d'être atteint (Barton & Tsourou 2000).

Prendre en compte les critères sociaux est indispensable pour tout aménagement urbain durable et cela passe notamment par une distribution équitable des services et des zones de détente ainsi qu'un accès à tous les lieux publics offerts à l'ensemble des citoyens. La qualité de l'expérience urbaine offerte est un élément social extrêmement important. De manière plus précise, tenir compte du contexte social, c'est chercher à identifier et à valoriser les préférences, les habitudes, les références culturelles des différents utilisateurs potentiels de l'espace, afin de favoriser les éléments qui vont dans le sens d'une plus grande appropriation de l'espace par les différentes populations habitant notre pays. D'autre part, les activités et lieux offerts devraient être pensés pour favoriser à la fois le bien-être individuel, la possibilité de se rencontrer ou de se réunir entre amis, familles,... ainsi que de se sentir appartenir à une communauté. Pour cela, il faut par exemple offrir des espaces de détente mais aussi des espaces de contact (barbecue, plaines de jeux,...) et des lieux de fête ainsi qu'une plus grande participation des habitants à l'aménagement de leur territoire.

Une des raisons de la faiblesse du dynamisme collectif urbain et du contrôle social se trouve dans la médiocre participation des habitants des villes modernes surtout des grandes villes à la vie publique urbaine. La recherche de la durabilité exige une conscience plus profonde de notre responsabilité collective vis-à-vis de la Terre et des générations futures. Chaque homme est citoyen du monde, habitant d'une même planète et membre de la communauté humaine. Toutes les couches de la société doivent donc avoir leur mot à dire dans les décisions concernant les besoins du développement durable et les mesures à prendre pour l'atteindre. La sensibilisation doit aller de pair avec le renforcement de la participation. Lors de la conception ou de la rénovation de quartiers, il est judicieux de mettre en place des lieux d'échanges et de diffusion de l'information sur différentes thématiques liées au développement durable.

Les espaces publics urbains remplissent également différentes fonctions écologiques étroitement liées aux questions de gestion des ressources naturelles, dont la maîtrise des eaux pluviales, l'augmentation de la diversité biologique et la purification de l'air. Ces différentes fonctions devraient être visibles dans les espaces collectifs.

Des promenades peuvent servir de liens entre lotissements, villages, ou zones urbaines et zones rurales. Ainsi, ces allées vertes peuvent à la fois servir de parcours pour une mobilité écologique et de corridors naturels de biodiversité ou de lieux où certains éco-systèmes spécifiques peuvent être implantés. Les anciennes voies de chemin de fer ou autres infrastructures linéaires qui ne sont plus utilisées peuvent être avantageusement transformées en promenades pour piétons, cyclistes, rollers, cavaliers,... aussi bien en ville qu'en dehors de la ville.

Pour agir avec efficacité en faveur de la biodiversité, il est important d'établir une planification concernant directement le développement de la biodiversité en milieu urbain mais aussi d'intégrer cette problématique dans les plans de développement de la ville et autres plans d'urbanisme.

Les réseaux de chauffage par quartier doivent être encouragés dans les nouveaux projets urbains car ils permettent d'inclure différentes sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie provenant de la biomasse, l'énergie éolienne ou l'énergie provenant d'installations solaires thermiques à grande échelle. Evidemment, les réseaux de chauffage urbain sont à conseiller uniquement pour des morphologies denses. Les meilleurs exemples de réalisations actuelles proviennent d'Europe du Nord. En matière de réseau de froid, Lund, en Suède, possède un réseau de climatisation développé à partir de pompes à chaleur géothermales exploitant les différentiels de température entre l'air ambiant et la mer baltique. Concernant les réseaux de chaleur, on peut citer la ville suédoise de Kungälv qui profite d'un réseau couplé à la plus grande chaufferie solaire de l'Union européenne. La photo ci-dessous montre les 10 000 m² de capteurs solaires thermiques qui alimentent le réseau de chaleur de Kungälv.



(Liébard & al. 2004).

Ainsi, à l'échelle de la planification urbaine, une collectivité peut faire des choix de conception qui influenceront fortement le bien-être de ses habitants et l'impact environnemental de cette urbanisation.

6.2 La morphologie urbaine

Les objectifs de conception de la morphologie urbaine pour le confort des piétons sont de :

- limiter les sources de pollution (air, eau, sol, bruit).
 - Limiter la circulation automobile
 - ...
- Générer un environnement confortable du point de vue physiologique par l'évaluation des différents paramètres physiques et leur adaptation éventuelle si nécessaire. Par exemple :
 - Créer des places et des promenades exposées au soleil en hiver mais partiellement ombragées en été,
 - Protéger les espaces publics des vents froids et dominants,
 - Eviter de concevoir des bâtiments élevés,
 - Assurer la ventilation des espaces publics,
 - ...
- Favoriser l'adaptation psychologique des piétons, grâce à :
 - la globalité de la sensation de confort,
 - l'identification d'une ambiance,
 - la relation au contexte,
 - la continuité des conditions environnementales,
 - la diversité des ambiances (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
 - la perception du contrôle possible,
 - la capacité de s'adapter,
 - la naturalité du lieu (qui est aussi marquée par le besoin de stimulations environnementales en milieu urbain),
 - la variabilité des conditions environnementales,
 - le caractère signifiant du lieu.

Pour limiter les consommations d'énergie d'un bâtiment, la réflexion énergétique, envisagée dès le choix du lieu d'implantation, s'attachera à réduire toutes les sources de consommation. Citons quelques stratégies importantes :

- diminuer l'énergie liée aux transports effectués par les utilisateurs du bâtiment.
- diminuer l'énergie liée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage du bâtiment. La conception des bâtiments et des espaces publics doit
 - maximiser les gains solaires en hiver.
 - minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe.
 - offrir la possibilité de refroidir le bâtiment grâce à la ventilation naturelle.
 - offrir la potentialité d'un éclairage naturel du bâtiment conçu et des bâtiments environnants.
- valoriser les ressources locales.
- favoriser les énergies renouvelables.

Tout développement urbain devrait tenter de réduire l'intensité de trafic automobile. Pour ce faire, les nouveaux bâtiments doivent être localisés autour ou proche des noeuds de transport public et être conçus autour d'un réseau de routes piétonnes qui encouragent la marche à pied et les cyclistes par une réduction des distances entre les services principaux. Les implantations en site urbain sont à favoriser en préférence (friches urbaines,...).

C'est au niveau de la morphologie urbaine, que les enjeux microclimatiques sont les plus importants. Les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des tailles et des hauteurs des coupes, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Le choix des types de matériaux de surface, la présence de surfaces d'eau et de végétation sont également des éléments à analyser.

Voici quelques règles simples pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics en fonction de l'ensoleillement:

- les bâtiments plus élevés sont placés du côté nord du site, pour tenir compte de l'effet d'ombrage.
- des hauteurs plus faibles sont conservées du côté sud.
- la création des places présente une orientation préférentielle vers le sud.
- l'ensoleillement est favorisé sur les places en hiver mais un ombrage est au moins partiellement accessible en été. L'utilisation d'arbres à feuilles caduques est un moyen privilégié pour le confort des piétons.

La largeur et l'orientation des rues d'une ville ont une influence sur les disponibilités qu'elle offre du point de vue climatique. Il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments.

Dans les climats froids et tempérés, les espaces ouverts devraient généralement être :

- assez larges pour permettre un accès au soleil dans les espaces publics.
- orienter les bâtiments pour qu'ils puissent profiter au maximum des gains solaires en hiver. Ainsi, une orientation E-O des rues est toujours idéale. Ceci dit, même lorsque la rue est d'orientation N-S, il est possible de donner une orientation des maisons vers le sud à condition de créer des décrochements ou de bénéficier du relief. Quand les rues sont orientées au NW-SE ou au NE-SW, l'accès au soleil peut être amélioré en créant un angle entre la rue et la façade.

Pour un bon ensoleillement des façades afin de profiter des gains solaires, on peut prendre les règles suivantes :

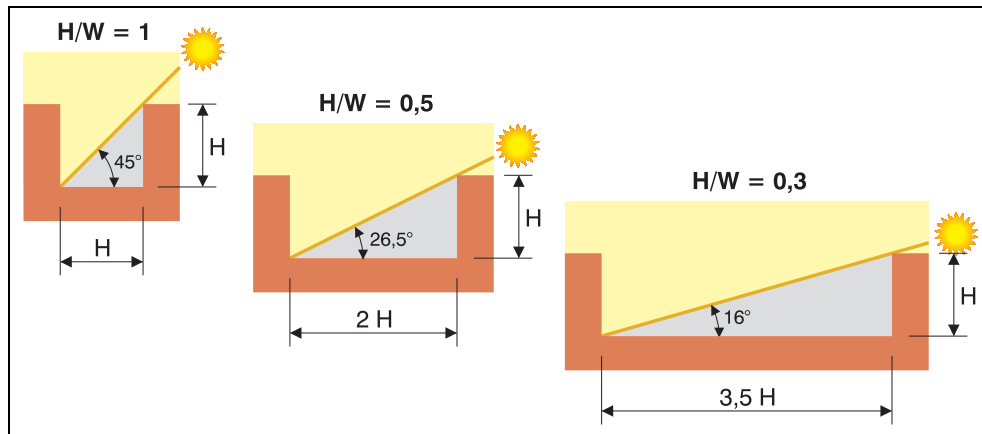
- pour une latitude supérieure à 50°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour les 21 janvier et le 21 novembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à « 70° - latitude du site ».
- pour une latitude comprise entre 46.5°N et 50°N, un angle d'obstruction maximal de 20° peut être choisi.
- pour une latitude inférieure à 46.5°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour le 21 décembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à « 66.5° - latitude du site ».

En Belgique, cela nous conduit à limiter les angles d'obstructions verticaux à 19.2° pour les orientations allant du sud-est au sud-ouest. Pour un bâtiment situé dans un tissu dense, on peut toutefois conseiller de mesurer l'angle d'obstruction vertical à partir de 2m de haut plutôt qu'à partir du sol.

Si l'angle d'obstruction à l'ensoleillement reste inférieur à la valeur de référence pour l'ensemble de l'angle allant du sud-est au sud-ouest, une conception solaire passive du bâtiment est vraiment conseillée. Lorsque l'ensemble de la zone sud-est-

sud-ouest est coupée de l'ensoleillée au-delà des limites fixées, la création d'une architecture qui prenne en compte les gains solaires est à abandonner ou bien il faut changer de site. Entre les deux, une étude plus poussée est nécessaire pour évaluer les gains solaires disponibles.

En général en Belgique, il est souhaitable que les angles d'obstruction des bâtiments ne dépassent pas 25° pour l'angle vertical, soit $H/W \leq 0.5$ sur la zone angulaire allant du sud-est au sud-ouest. Mais il serait idéal d'avoir au moins une distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments ; cet angle vaut 15.8° à Uccle et correspond au rapport $H/W=0.3$. De plus, vu qu'en Belgique le ciel est souvent couvert, il est judicieux de choisir des surfaces de sol qui soient plutôt claires pour augmenter les réflexions lumineuses. De même au niveau des façades, les surfaces exposées au sud, devraient présenter des coefficients de réflexion plus élevés pour renvoyer la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face. Il faut toutefois éviter les surfaces très réfléchissantes (miroir,...) au sud car elles peuvent causer de l'éblouissement.



Nous pouvons donc conclure que l'accès au soleil est un critère critique au niveau de l'urbanisme en Belgique.

Pour correspondre aux préférences des utilisateurs des espaces publics, le potentiel d'ensoleillement direct d'un espace public devrait couvrir entre 20% et 80% de sa surface totale quelle que soit l'heure ou la saison. Et il faudrait favoriser les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. En première approximation, ces zones correspondent aux parties de l'espace pour lesquelles le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de l'espace reste inférieur à $1/2$ (c'est-à-dire $H/W < 0.5$).

Bien sûr, il est fondamental d'étudier les zones d'ombre et d'ensoleillement sur une place avant de l'aménager. Par exemple la position d'une terrasse de café sur l'espace public peut dépendre de la position du soleil.

Evidemment, les centre-villes historiques nécessitent souvent des niveaux d'obstruction solaire supérieurs pour conserver une homogénéité de hauteur entre les édifices et s'inscrire dans le contexte construit local. Dans ce cas, les exigences d'éclairage naturel et d'ensoleillement doivent être étudiées avec précaution. Parfois, la limitation de l'éclairage naturel disponible peut être compensée par des plus larges fenêtres, des matériaux et couleurs réfléchissantes et une profondeur de

bâtiments réduite. Dans certains cas, une conception solaire passive ne pourra être appliquée qu'aux étages supérieurs.

Par ciel couvert, l'orientation de l'espace public n'a pas d'influence sur son ambiance lumineuse. C'est uniquement l'angle de vue du ciel qui définit la possibilité de pénétration du rayonnement solaire diffus et donc la disponibilité sous ciel couvert de la lumière naturelle. Une rue dont la hauteur est faible sera toujours mieux éclairée au niveau du sol qu'une rue de même largeur mais dont les bâtiments sont plus élevés. Notons que dans le cas de bâtiments présentant un retrait au niveau des étages supérieurs, le facteur de vue du ciel est fortement augmenté. En Belgique, il est fortement conseillé d'adopter une forme évasée dès que la hauteur des bâtiments atteint le double de la largeur de la rue.

Notons que pour des espaces publics étroits, la lumière qui atteint les niveaux supérieurs des bâtiments est plus importante que celle qui pénètre jusqu'au sol. Vu que le facteur de réflexion des murs est normalement supérieur à celui des vitrages, l'augmentation de la surface des murs dans la partie supérieure des bâtiments améliore la luminosité de l'ensemble de la rue et accroît la lumière disponible aux étages inférieurs de ces bâtiments. Adapter la taille des ouvertures à l'étage auquel elles appartiennent est donc également un élément essentiel de l'efficacité de la de distribution lumineuse en ville. Ainsi, nous recommandons que les surfaces vitrées des étages supérieurs soient plus petites que celles des étages inférieurs.

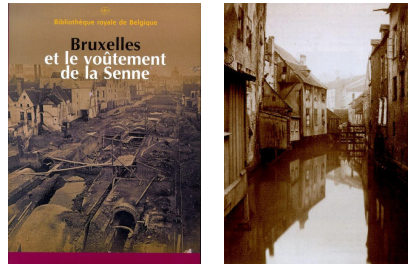
Les plantes à feuilles caduques apportent une protection solaire naturellement variable. En été, le feuillage fournit un ombrage; en hiver, la chute des feuilles fait profiter les bâtiments des apports gratuits du soleil. En général, on recherchera des essences à feuilles caduques qui présentent peu de branchage pour avoir un ombrage minimum en hiver mais avec un feuillage dense en été. Les arbres à feuilles caduques sont un très bon système de protection solaire pour les orientations est et sud-est ainsi que pour les orientations ouest et sud-ouest. En effet, pour ces orientations, le soleil est bas en début de matinée et en fin d'après-midi.

Aménager ou ré-aménager les centres d'îlots urbains peut aussi être une solution pour favoriser le confort des habitants et les consommations d'énergie du bâti. En effet, l'intérieur des îlots fortement construits comprennent parfois des annexes ou même des bâtiments complets. Dans certains cas, dans les climats où la saison de chauffe prédomine, retirer les constructions sous-utilisées ou délabrées d'un îlot urbain permet de réaménager son centre de façon à pouvoir bénéficier de l'accès au soleil et d'une meilleure privacité à l'intérieur des habitations ainsi que d'un espace suffisant pour implanter une zone verte. Cette zone verte peut soit être privée, soit être semi-publique (c'est-à-dire qu'elle profite à l'ensemble des habitants de l'îlot) ou encore être publique (c'est-à-dire qu'elle s'ouvre sur l'extérieur et profite donc à l'ensemble des citoyens passants par là).

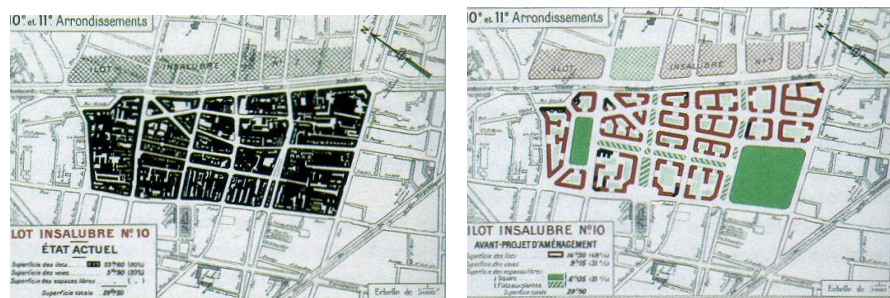
L'urbanisme hygiéniste a consisté au 19^{ème} siècle à étudier la question de l'air, de la lumière et de l'eau dans nos villes hyper denses. Les grandes villes ont procédé progressivement à l'assainissement de leur tissu par plusieurs types d'actions urbaines (Deprez 2003-b) :

- la création de zones aérées et de parcs en pleine ville, comme Central Park (1857).
- la rectification ou le voûtement des cours d'eau qui avaient précédemment permis le développement des quartiers d'activités artisanales, mais

provoquaient inondations ou épidémies (Bruxelles, couverture de la Senne en 1867).



- des campagnes de travaux visant à dédensifier la ville ancienne, devenue insalubre et à lui rendre un peu d'air frais. Citons par exemple l'Haussmanisation, le curage et la réhabilitation de nombreux îlots insalubres à Paris. Ci-dessous, les plans d'une opération de salubrité publique d'un ensemble d'îlots surdensifiés dans le 10^{ème} arrondissement de Paris (1900).



Opérations de salubrité publique en 1900 dans le 10^{ème} arrondissement de Paris (Deprez 2003).

La transformation d'îlots urbains existants est toutefois une action délicate qui demande d'en étudier soigneusement les différents aspects et de prendre en compte le point de vue des différents acteurs concernés. Les contextes physique (topographie, microclimat, orientation,...), construit (type de bâtiments, ...) et humain (réseaux sociaux,...) sont à prendre en considération pour élaborer la solution la plus appropriée à un site spécifique. Il est recommandé de concevoir les modifications les plus faibles du tissu urbain qui génèrent des changements efficaces, afin de respecter l'environnement existant.

Dans les climats chauds, il faut favoriser le refroidissement naturel des espaces publics. Pour des rues dont le rapport H/W est inférieur à 0,3, la ventilation est bonne mais l'ombrage est faible. Par contre, pour un rapport H/W élevé, la ventilation est mauvaise mais l'ombrage est nettement amélioré : des zones d'air stagnant peuvent se créer qui seront plus froides en été que l'air ambiant mais qui risquent d'être polluées s'il y a du trafic. Les rues N-S sont les moins exposées au soleil. Pour un maillage orthogonal, des rues orientées NW-SE et NE-SW offrent un ombrage moyen sur l'ensemble du réseau de rues.

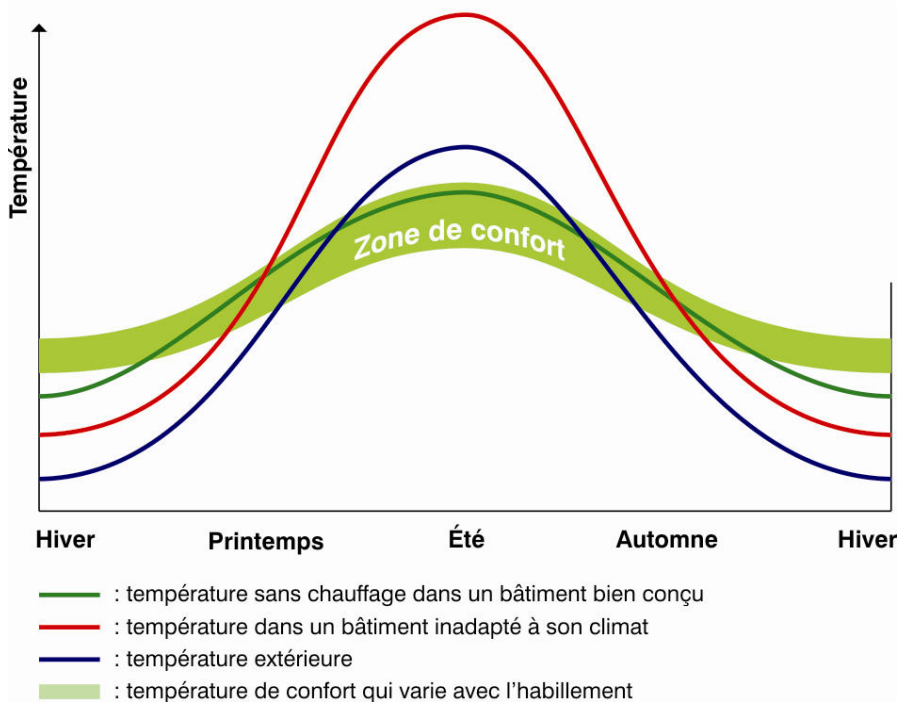
Dans les climats chauds, l'orientation E-O doit être évitée ou bien le rapport H/W doit être très élevé pour cette orientation. Ainsi, pour une rue E-O, l'ombrage est assuré à Rome si le rapport H/W vaut 3,5 et à Athènes s'il vaut 4.... L'orientation des rues la plus bénéfique pour les pays chauds est donc l'orientation N-S. Cependant, comme les villes sont généralement constituées de rues environ perpendiculaires, un maillage orienté NE-SW/SE-NW offre une pénétration du soleil nettement inférieure à un maillage E-O/N-S. Un exemple pratique confirme cette étude théorique : le quartier de Santa Cruz à Séville, qui offre un microclimat

spécialement agréable dans cette ville où la chaleur est souvent un problème, a été conçu selon une grille NE-SW/SE-NW et des rues étroites et profondes (Littlefair & al. 2000).

Pour les climats chauds et secs, des rues étroites sont à conseiller pour conserver un ombrage et ainsi limiter les surchauffes dues au rayonnement solaire direct et au rayonnement réémis par les surfaces construites. Ensuite, il est intéressant de chercher à rafraîchir les espaces publics en augmentant le taux d'humidité dans l'air (bassins, tours à vent avec humidificateur, végétation,...). Des rues plus larges doivent toutefois être utilisées s'il y a un risque de pollution. Dans ce cas, des systèmes de protections solaires peuvent être introduits au niveau de l'aménagement urbain, soit au niveau du sol (arbres, arcades, ...) soit en toiture (voiles mobiles,...). Il faut aussi stopper les vents chauds et les vents qui apportent la poussière, le sable,...

Dans ces climats chauds et humides, il est essentiel de limiter le rayonnement solaire direct et d'augmenter la ventilation naturelle des espaces publics urbains. Ainsi, il est préférable d'élargir fortement les canyons pour ventiler l'espace urbain tout en ajoutant des protections solaires aux bâtiments pour créer un ombrage des façades et des piétons.

Essayer de créer des microclimats urbains proches de la zone de confort pour les piétons permet de limiter fortement les dépenses énergétiques des bâtiments car ce sont aussi les températures qui demandent le moins d'énergie pour chauffer ou refroidir l'intérieur des bâtiments. Un bâtiment inadapté à son climat a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Un rattrapage technologique coûteux est nécessaire pour assurer le confort dans ces bâtiments, qui consomment alors de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort parfois juste acceptable. Le graphe ci-dessous montre que, pour assurer le même niveau de confort intérieur, un bâtiment mal adapté à son climat consommera donc nettement plus d'énergie qu'un bâtiment inséré dans un contexte microclimatique favorable et conçu pour en profiter.



Une différence de quelques degrés peut suffire à faire franchir un « seuil de confort ». Des études empiriques montrent qu'il est possible, en climat tempéré, de gagner 5 à 7.5% du coût de l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments pour 1°C d'augmentation de la température moyenne (Oke 1988). Enfin, la réduction de l'écart entre les températures intérieures et extérieures est considérée comme un élément du confort psychologique des personnes.

La température extérieure est un facteur climatique essentiel pour la détermination des besoins en énergie d'un bâtiment. L'évaluation de la demande en énergie des bâtiments nécessite en effet la prise en compte de l'écart de température entre l'ambiance intérieure et l'extérieur. Les éléments suivants aident à limiter fortement les pertes de chaleur en période de chauffe, ce qui est un critère de conception essentiel en climat tempéré:

- la densité du bâti et la concentration des activités. L'îlot de chaleur est bénéfique pour notre climat au niveau des consommations d'énergie des bâtiments : si la température extérieure est plus chaude, la différence de température int/ext est plus faible, en période de chauffe, ce qui réduit les pertes de chaleur à la fois par conduction et ventilation/infiltration.
- la protection par rapport aux vents dominants, grâce à l'effet de masque urbain, à une meilleure étanchéité des bâtiments, à la réduction des surfaces exposées au vent ou à l'installation d'écrans extérieurs (bâtiments ou murs de grande longueur, végétation, brise-vents, etc).
- l'utilisation de la compacité du bâti, c'est-à-dire réduire le rapport entre surfaces et volumes pour créer des bâtiments compacts. Des maisons individuelles consomment jusqu'au double d'énergie au m² que des appartements dans un immeuble multifamilial.
- éviter les sites situés au sommet des collines ou au fond des vallées ; la zone intermédiaire est la plus bénéfique.

Ainsi, une habitation en ville dépense nettement moins d'énergie en hiver qu'une habitation en zone rurale grâce à une combinaison de la réduction de l'exposition au vent, de l'augmentation de la température due à l'effet d'îlot de chaleur et de l'augmentation de la compacité du bâtiment grâce à la mitoyenneté.

En climat froid, les zones urbanisées de manière dense sont indispensables pour profiter un maximum de la chaleur apportée par les autres bâtiments et les activités humaines. En revanche, l'effet d'îlot de chaleur est négatif pour les climats chauds et en périodes de surchauffes pour les autres climats.

Une conception adaptée de la ville permet de diminuer ou d'augmenter cet effet d'îlot de chaleur en fonction du résultat désiré. Ainsi, une conception microclimatique précise d'un quartier urbain dans les pays chauds peut contrebalancer l'effet d'îlot de chaleur et même générer un effet d'oasis, c'est-à-dire de fraîcheur par rapport à la température de l'air en dehors de la ville. C'est le cas du quartier Santa Cruz à Séville qui présente des températures moyennes de l'air en journée de 4 à 8°C inférieures à celles mesurées au niveau de l'aéroport de la ville. Cet effet d'îlot de fraîcheur est créé par la conception urbanistique de ce quartier traditionnel : rues très étroites (ombragées toute la journée), matériaux à fortes inertie, couleurs claires.

Pour conserver un minimum d'effet d'îlot de chaleur urbain et donc limiter les consommations de chauffage des bâtiments tout en élargissant la période de confort dans les espaces publics urbains en Belgique, nous devrions concevoir une morphologie urbaine dont le rapport H/W ne descend pas en-dessous de 0.4 (Oke 1988).

Pour les bâtiments en climat tempéré, les bénéfices énergétiques fournis par un accroissement de la densité grâce à une diminution des pertes de chaleur s'équilibrent à un moment avec les pertes énergétiques dues à la densification qui induit une diminution de la disponibilité de l'éclairage naturel, de la ventilation naturelle et des gains solaires. Le paramètre de la densité plus élevée est toutefois le facteur de conception primordial car il est davantage bénéfique à l'environnement que l'utilisation des gains solaires : les consommations d'énergie liées au transport y seront réduites ainsi que les consommations d'espace et de ressources en paysages naturels. Toutefois, certaines formes de bâtiments favorisent l'utilisation des éléments naturels par rapport à d'autres. Citons par exemple le fait d'avoir une profondeur de bâtiment assez faible pour pouvoir créer une ventilation transversale.

Une manière d'augmenter la densité construite et l'efficacité énergétique simultanément consiste à augmenter la compacité du tissu urbain tout en conservant une profondeur de bâtiments faible (de l'ordre de 10 à 12m), avec une orientation solaire appropriée des façades.

Les bâtiments résidentiels et les bâtiments de bureaux ont des comportements très différents en rapport au climat. Les habitations ont des besoins de chauffage qui dépassent toujours sur l'ensemble de l'année les besoins de refroidissement, même pour le sud de l'Europe. Par contre, la situation s'inverse pour les bureaux. Même en Belgique, les bâtiments de bureaux demandent plus d'énergie pour leur refroidissement que pour leur chauffage. Ce résultat est sans doute valable pour d'autres bâtiments non-domestiques de grande taille tels que les supermarchés et bâtiments industriels. (Littlefair & al. 2000)

Avec la méthode LT déterminée par Baker et Steemers pour déterminer les implications énergétiques des bâtiments (Baker & Steemers 2000), un immeuble de bureau ventilé naturellement consomme trois fois moins qu'un immeuble de bureau refroidi par air conditionné lorsque sa profondeur est de 12m. Lorsque la largeur du bâtiment passe de 12 à 24m, les consommations d'énergie du bâtiment ventilé naturellement doublent alors que les consommations d'énergie du bâtiment refroidi à l'aide d'un système à air conditionné augmentent seulement de 20% (Steemers 2003). On peut donc tirer deux conclusions importantes :

- pour favoriser l'efficacité énergétique d'un bâtiment ventilé naturellement, il est important que sa largeur soit la plus étroite possible (idéalement aux environs de 12m de large).
- pour un immeuble de bureau de 24m de large, un bâtiment ventilé naturellement consommera encore 1.8 fois moins qu'un bâtiment refroidi à l'aide d'un système d'air conditionné et ce rapport augmentera jusqu'à 3 pour une largeur du bâtiment de 12m au lieu de 24m.

Les zones d'un édifice qui peuvent être éclairées et ventilées naturellement sont appelées « passives ». En général, en se basant sur des données empiriques, toutes les parties de bâtiments situées à une distance égale ou inférieure à 6m d'une façade (ou plus exactement au double de la hauteur du local) sont considérées comme passives alors que les zones situées à plus de 6m d'une façade du bâtiment sont considérées comme n'étant pas passives (Ratti & al. 2005). On retrouve donc une largeur maximale de 12m pour une utilisation passive du rayonnement solaire et de la ventilation naturelle. La proportion de surfaces passives par rapport aux surfaces totales du bâtiment présente une estimation du potentiel d'utilisation des techniques passives de limitation de la consommation d'énergie des bâtiments. Il faut toutefois rappeler qu'il s'agit seulement d'un potentiel qui peut être exploité

ou non en fonction des choix de l'architecte en matière de conception du bâtiment et de choix des systèmes (% de surfaces vitrées, protections solaires, HVAC, ...) ainsi que des usages des occupants.

Au niveau des vents, une densité urbaine moyenne permet d'arrêter les vents froids en créant un effet de masque tout en permettant la ventilation naturelle des bâtiments. La facilité avec laquelle une ventilation traversante peut s'installer en climat tempéré, même en ville, a été confirmée par des simulations numériques et des tests in situ en Belgique et à Athènes (van Moeseke & al. 2005 ; Niachou & al. 2005). Vu ce constat et le rôle non négligeable du vent sur l'augmentation des déperditions par infiltration, nous en concluons qu'il n'est pas utile sous notre climat de rechercher à tout pris les implantations les plus venteuses, d'autant plus que la ventilation naturelle des bâtiments peut fonctionner même sans vent par effet thermique. Ainsi, une implantation des bâtiments en zone urbaine réduit de manière évidente les déperditions par infiltrations sans compromettre l'utilisation du refroidissement naturel.

Si l'on veut accroître les possibilités de refroidissement naturel des bâtiments, l'orientation du vent devrait de préférence être oblique (30° à 60°) par rapport à leurs façades principales pour favoriser leur ventilation naturelle. En revanche, les infiltrations sont maximales pour un vent à 45° par rapport au bâtiment. Il y a donc un conflit d'intérêt entre la limitation des infiltrations et le refroidissement à l'aide de la ventilation naturelle des bâtiments. Pour des bâtiments isolés, il est donc important de veiller à ce qu'ils soient bien étanches si on les place à 45° des vents dominants; parfois, il sera même nécessaire d'implanter de la végétation pour ralentir la vitesse du vent. En revanche, dans un milieu urbain relativement dense, nous recommandons de favoriser la ventilation naturelle vu que le tissu urbain sert déjà de protection au vent et ralentit sa vitesse moyenne. Ainsi, des rues orientées est-ouest pour permettre le meilleur ensoleillement sont également bénéfiques pour la ventilation en Belgique puisque le vent dominant vient du Sud-Ouest. La possibilité d'utiliser une ventilation naturelle à la place de l'air conditionné n'est possible que pour un environnement qui n'est pas trop bruyant ou trop pollué. C'est ainsi que la diminution de l'utilisation des voitures peut avoir une importance significative sur l'énergie utilisée dans les bâtiments.

Dans les pays froids, il est possible de réduire l'humidification des façades par le contrôle du vent car limiter la vitesse du vent réduit également les projections de pluies fortes ou de neige sur les façades. Ainsi, dans ce cas, le contrôle du vent a un double effet thermique : celui de limiter les pertes de chaleur dues aux infiltrations d'air ainsi que limiter l'accroissement de la transmission thermique des murs due à leur humidification. Dans les climats froids ou en périphérie d'une urbanisation située en climat tempéré ou en bordure de mer, une organisation des îlots en quinconce réduit la vitesse du vent avec efficacité.

Les règles de conception de la morphologie urbaine pour limiter les consommations d'énergie des bâtiments dans un climat tempéré peuvent être synthétisées comme suit :

- Maximiser les gains solaires en période de chauffe
 - Limiter les obstructions des bâtiments, surtout entre le SE et le SO.
 - Maximiser les façades d'exposition au sud, tout en ne limitant pas l'accès au soleil des autres.
 - Favoriser l'orientation des rues le long de l'axe E-O.
 - Offrir une bonne accessibilité possible à la lumière naturelle (SVF)

- Minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe :
 - Profiter de l'îlot de chaleur généré par la densité urbaine.
 - Favoriser la compacité des bâtiments (mitoyens).
- Rendre possible le refroidissement naturel :
 - Favoriser les brises d'été,
 - Limiter la circulation automobile,
 - ...

Tous les bâtiments du quartier écologique Vauban (Fribourg-en-Brisgau, Allemagne) devaient répondre au moins aux exigences du label Habitat à Basse Energie, correspondant à une consommation de chauffage maximale de 65 kWh/m²/an, soit l'équivalent de 6,5 litres de fioul/m² de surface utile. La ville de Fribourg a également planifié des espaces en bandes prévus spécifiquement pour les maisons répondant au label d'Habitat passif. L'orientation principale des bâtiments y est nord/sud et les habitations sont libres d'ombres portées, afin d'optimiser les apports énergétiques solaires en hiver. Ces maisons sont pensées pour ne pas dépasser une consommation de 15 kWh/m²/an. Ces logements utilisent les énergies renouvelables pour leur chauffage. Les façades sud sont très vitrées alors que les façades nord présentent des ouvertures minimales. Une usine de cogénération construite par la ville de Fribourg, alimentée à 80% par des copeaux de bois et à 20% par du gaz naturel, dessert en chaleur l'ensemble des logements du quartier Vauban, à l'exception des maisons passives.



Façade nord (IMBE 2005)



Façade sud (IMBE 2005)

Les maisons « actives » ou « positives » produisent, quant à elles, plus d'énergie qu'elles n'en consomment, grâce à des capteurs photovoltaïques.



Maisons « Plus energy » à Fribourg (architecte : Rolf Disch ; photos : IMBE 2005)

Dans les climats chauds, la stratégie inverse est nécessaire. La conception urbaine devrait permettre de réduire l'effet d'îlot de chaleur, générer des poches de fraîcheur.

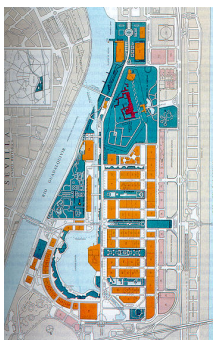
Les facteurs suivants sont donc à prendre en considération :

- une localisation proche de réservoirs de fraîcheur comme la mer, les lacs, les forêts et les parcs, de préférence sous le vent de ceux-ci,
- des zones piétonnes ou à faible trafic,
- ombrager les zones ensoleillées en été grâce aux arbres et bâtiments,
- utiliser des matériaux à forte capacité thermique,
- utiliser des surfaces à haute albédo pour réfléchir le rayonnement.

Les deux méthodes les moins coûteuses pour réduire l'effet d'îlot de chaleur sont d'augmenter la végétation dans les villes et d'utiliser des revêtements de façades de couleur claire plutôt que des matériaux sombres. La végétation joue un double rôle, celui d'ombrage et celui de réduire la chaleur de l'air par évapotranspiration.

Dans les pays chauds et secs, il faut favoriser l'ombrage des espaces publics et le refroidissement par évaporation. Une étude réalisée dans la ville de Fès compare un quartier traditionnel du tissu urbain très dense de la médina (tracé des rues irrégulier et $H/W = 7$ à 10) et d'autre part, un quartier relativement nouveau à faible occupation du sol (rues régulières et $H/W = 0.5$ à 0.7). Les températures par journées claires dans le quartier traditionnel sont jusqu'à 10°C plus basses que dans un quartier moderne et ceci aussi bien en été qu'en hiver, parce qu'il limite la pénétration du rayonnement solaire dans les espaces publics. Par contre, la nuit, le quartier traditionnel reste toujours plus chaud que le quartier moderne. Les températures des parois restent très stables et proches de la température de l'air pour les bâtiments de la médina traditionnelle alors que les températures superficielles varient fortement dans le quartier moderne entre le jour et la nuit. Cette étude démontre qu'un tissu urbain plus dense que celui prévu actuellement est en général nécessaire dans les pays chauds et secs pour améliorer le confort d'été en milieu urbain. Les simulations effectuées pour compléter les mesures effectuées sur le terrain suggèrent que le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues doit être au moins de 2 ($H/W \geq 2$). Vu qu'en hiver, les canyons plus larges accueillent davantage le rayonnement solaire, cette étude propose de prévoir des canyons ayant un rapport H/W se situant entre 0.7 et 2 ; les rues les plus larges étant bordées d'arbres et les constructions munies d'arcades pour ombrager le sol et protéger les piétons du soleil en été tout en profitant de l'ensoleillement en hiver (Grundström & al. 2003). Dans les climats à fortes variations entre le jour et la nuit, un facteur de vue du ciel relativement étroit diminue cet écart généralement très inconfortable.

L'expo de Séville en 1992 regroupe 100 pavillons internationaux couvrant une superficie de 50 hectares, dont les $\frac{3}{4}$ sont des espaces extérieurs. Globalement le site de l'exposition universelle, qui a eu lieu en 1992 à Séville, profite des brises fraîches générées par le fleuve. Un lac artificiel a été aménagé en fonction des vents dominants pour tempérer la sécheresse de l'air. Sur 170 ha d'espaces publics, 30 ont été aménagés en jardins et 35 km de voiries ont été plantés d'arbres. L'eau a été utilisée par des fontaines, des murs d'eau, des jets, des cascades et des bassins.



Plan de l'expo'92 à Séville (Grupo de Termotecnia 1994).

Les espaces de détente, pour le repos, la restauration ou l'information entre deux visites, ont été étudiés du point de vue microclimatique et présentent différents dispositifs pour améliorer le confort. Les stratégies de contrôle du microclimat utilisées comprennent: la végétation, l'ombrage, la ventilation naturelle, l'évaporation de l'eau, l'inertie thermique du sol, des systèmes de dissipation de la chaleur et des systèmes de filtration de l'air.

Du point de vue du rayonnement solaire, l'objectif le plus important est de créer un ombrage sur l'ensemble de la zone de l'exposition utilisée en journée pour se reposer. Mais la température de surface inférieure de l'ombrage est également un élément important pour éviter que les personnes soient soumises au rayonnement de cette surface surchauffée. Ainsi, plusieurs solutions ont été mises en évidence (Grupo de Termotecnia 1994):

- des couvertures végétales car les plantes absorbent une grande partie de l'énergie solaire mais qu'elles l'utilisent dans leur processus de transpiration, ce qui maintient leur température de surface au niveau de la température ambiante.

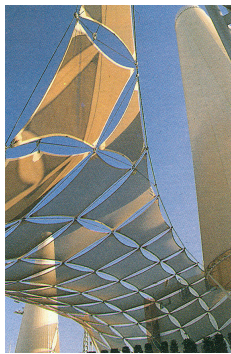


(Grupo de Termotecnia 1994).



(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures dont la forme est étudiée de manière aérodynamique pour que l'air évacue la chaleur de cette surface par convection.



(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures doubles, permettant une aération entre les deux surfaces. La température de la surface inférieure de l'ombrage reste alors à la température de l'ambiance.

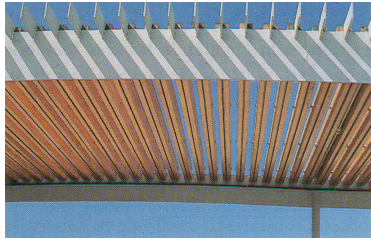


(Grupo de Termotecnia 1994).



(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures formées de lamelles multiples, laissant passer l'air entre chacune d'entre elles et permettant de voir le ciel à travers l'ombrage. A Séville, la température inférieure de ce type de couverture était environ égale à la température ambiante +2°C.



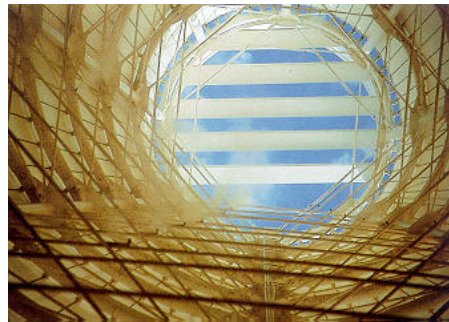
(Grupo de Termotecnia 1994).

D'autres dispositifs sont également utiles. Ainsi, par exemple, sur le site de l'expo'92, l'avenue de l'eau est une allée qui utilise la présence de bassins et de fontaines pour le confort thermique des visiteurs. La température de surface de l'eau étant faible par rapport au corps humain, les surfaces d'eau refroidissent les personnes par rayonnement. Quant l'eau est en mouvement, sa température demeure encore plus basse que si elle est immobile dans un bassin. De plus, la présence de jets d'eau humidifie et refroidit l'air qui passe au-dessus du bassin et diminue la température de la zone de détente qui le jouxte.



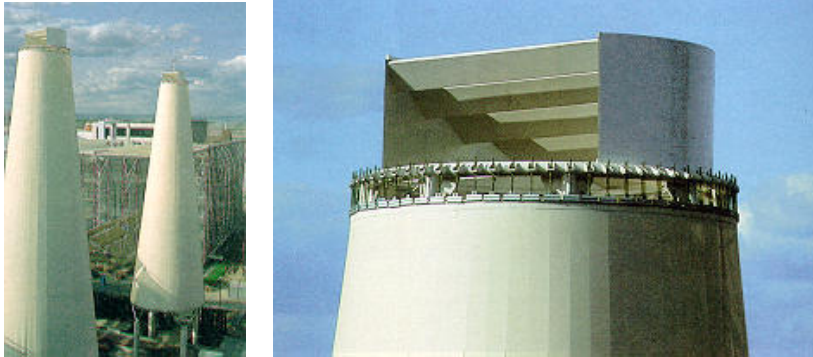
(Grupo de Termotecnia 1994).

Dans l'expo de Séville, l'avenue de l'Europe est un espace de détente, de 300m de long et de 80m de large au sein du quel se trouve un jardin de 40m de large sur toute la longueur. Cet espace public est à citer pour son microclimat, travaillé à partir de ses bassins, des toits parasols et d'un élément spécifique : la conception de 12 tours réfrigérantes. De forme conique, ces tours de 30m de haut sont habillées d'un textile blanc réfléchissant le rayonnement solaire. La base est ouverte sur une hauteur de 5m. Le diamètre de ces tours varie de 8m pour la base à 3m pour le cercle supérieur de la tour. Le jardin est entouré d'une enceinte de 2.5m de haut dont les 12 tours marquent les 12 portes.



Tours de refroidissement naturel. (Photos : Grupo de Termotecnia 1994).

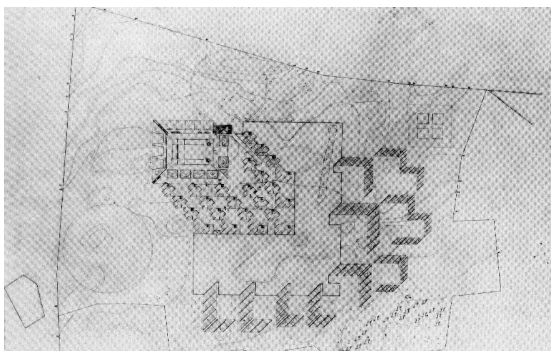
Dans les tours de refroidissement, des vaporisateurs projettent de l'eau « brumisée » sous la forme de micro-gouttes afin d'augmenter la surface d'évaporation et ainsi d'accroître fortement l'efficacité du refroidissement de l'air. L'air entre au sommet, se rafraîchit par l'évaporation de l'eau brumisée à l'intérieur, puis l'air frais descend, chargé d'humidité, sur l'espace public.



Tour de refroidissement. Capteur d'air au sommet des tours
(Photos : Grupo de Termotecnia 1994).

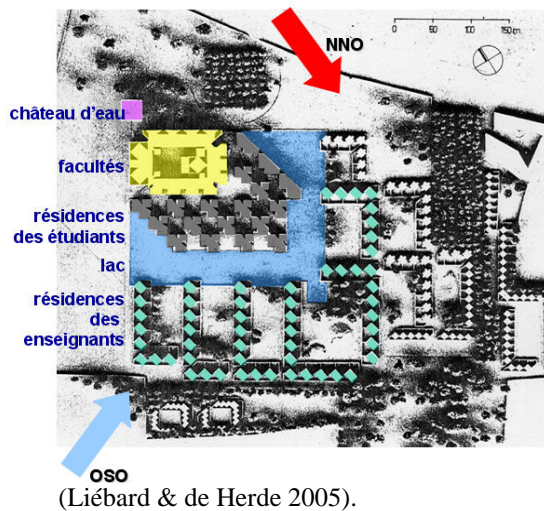
Une conclusion importante est que pour ce type d'application, il est indispensable que le volume d'air à traiter soit bien délimité. Un espace peu confiné implique une grande entrée d'air extérieur, ce qui limite l'efficacité des systèmes de refroidissement naturel. Il est également recommandé de placer les systèmes de refroidissement de l'air ou d'humidification en tenant compte de la direction des vents dominants.

Dans les pays chauds et humides, il faut favoriser la ventilation des espaces publics, alliée à l'ombrage de ceux-ci. Un bel exemple d'urbanisme microclimatique en climat chaud et humide est la cité universitaire que L. Kahn à conçue à Ahmedabad, en Inde. Il s'agit de l'Institut indien de Gestion, dont le plan d'ensemble comprend non seulement les bâtiments facultaires mais aussi des résidences d'étudiants et des logements pour les enseignants. La recherche de l'air est primordiale pour rafraîchir les locaux. A travers l'orientation du plan masse de l'Indian Institute of Management, l'attention de l'architecte s'est portée sur le travail de l'ombrage, par de larges enfilades de portiques et le travail de l'aération. L'architecte Louis Kahn explique que « *Les maisons des enseignants sont tournées vers le vent ; tous les murs sont parallèles à sa direction. Ils se mettent en épi par rapport à une cour pour l'enclorre et se conformer à la rigueur exigée par l'orientation. (...) L'orientation par rapport au vent et l'ombrage ont fourni les éléments architecturaux de la composition (...) Il faut sans arrêt considérer l'orientation comme une qualité dont les gens ont désespérément besoin. C'est cela qui est à la base de ces formes diagonales.* »



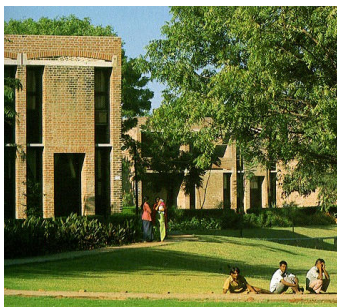
Croquis de L. Kahn à la fin de l'année 1963. (Plan : Deprez 2003).

L'orientation définitive du projet s'est établie progressivement en tenant compte de la direction des vents. L'axe de l'ensemble de la cité universitaire se réfère aux vents d'été (rafraîchissants : ouest/ sud-ouest) et aux vents d'hiver (froids : nord/nord-ouest). La figure ci-dessous en donne le plan masse.



Les résidences des étudiants forment au nord un bloc compact qui garantit un meilleur ombrage des cours. En hiver, le vent souffle parallèlement à la diagonale (N/N-O) des dortoirs sans s'engouffrer dans les enfilades de portiques : leur alignement faisant office de protection mutuelle. En été, le vent (O/S-O) rafraîchit les portiques et les escaliers communs en s'engouffrant entre les deux ailes de chambres. Les arcs tendus au ras du plafond des salles communes des dortoirs assurent leur ventilation haute. Les résidences des enseignants font face au vent d'été et lui sont ouvertes de part en part. Le plan des logements, ouvert et traversant, permet une meilleure ventilation naturelle. Par contre, les longs côtés sont complètement fermés au vent d'hiver. Les arcs tendus en pied de terrasse permettent la ventilation de celle-ci et son utilisation traditionnelle comme lieu de repos nocturne en été. Le lac, séparant les résidences d'étudiants des logements académiques, agit comme tampon thermique.

La cité universitaire d'Ahmedabad conçue par L. Kahn est donc un exemple magnifique d'un urbanisme contemporain qui intègre totalement le microclimat dans les principes fondateurs de son architecture. Il s'agit d'un ensemble urbanistique qui profite réellement des éléments bénéfiques d'un climat difficile tout en se protégeant de ses contraintes. La photo ci-dessous illustre les bâtiments orientés au nord-est (vent dominant). La façade est très épaisse afin de réduire l'insolation sur les vitrages. Les arcades ouvertes au niveau du toit-terrasse créent une ventilation naturelle pour déstocker la chaleur accumulée la journée et permettre aux occupants d'y dormir la nuit à l'air libre.

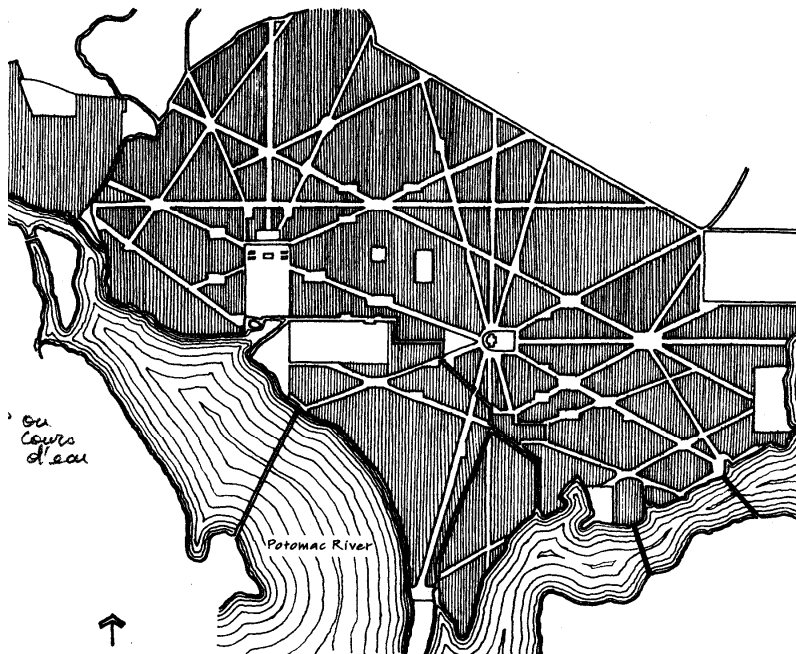


Logements à Ahmedabad. Architecte : Louis I. Kahn. (Deprez 2003)

Comme règle simplifiée, on peut estimer que des larges avenues arborées et des parcs linéaires ouverts de 100m de largeur ou davantage sont utiles pour refroidir les villes pendant les nuits sans vent. Si en plus on oriente certains de ces corridors de ventilation parallèlement aux vents dominants, on canalise le vent vers le centre urbain dense. Une stratégie pour ventiler les villes est donc celle de créer des corridors de ventilation radialement connectés à des espaces ouverts de refroidissement de l'air tels que parcs ou cours d'eau. L'effet d'îlot de chaleur, actif surtout la nuit, cause une distribution du vent centripète allant des zones de faible densité aux zones de forte densité. Deux éléments de conception sont nécessaires :

- une surface importante non urbanisée, de préférence une surface végétale ou une surface d'eau, à l'extérieur de la zone à ventiler afin de servir de source de refroidissement.
- des corridors larges pour fournir un passage à l'air provenant des zones moins denses vers les zones les plus denses. Cela suppose donc des voies vertes ou de larges boulevards organisés de manière à converger vers un ou plusieurs centres.

Le plan de Washington DC, dessiné par Pierre L'Enfant en 1791, peut servir d'exemple à un urbanisme bien ventilé grâce à ses larges avenues axiales allant des bords de la ville vers son centre. Dans ce cas, les avenues se rejoignent en différentes places considérées comme des centres de développement pour la ville. De plus, le vent d'été à Washington vient du sud et entre donc dans la ville en passant au-dessus de l'importante surface d'eau que constitue la rivière Potomac (Brown & DeKay 2001).



Plan Washington DC (Brown & DeKay 2001).

En milieu urbain, des espaces ouverts d'au moins 200m de long sur 200m de large, permettent au vent de retrouver la vitesse qu'il aurait sans les obstacles construits.

Dans des régions où la topographie est significative, on peut également utiliser cette caractéristique locale pour bien ventiler une urbanisation. En effet, les courants d'air générés par la gravité y sont souvent significatifs pendant les nuits sans vent. L'air froid, plus dense, descend vers le fond des vallées, comme le ferait

l'eau. Pour utiliser ce principe en zone urbaine, il faut placer des zones végétales non urbanisées sur les pentes les plus élevées comme source de refroidissement à partir de laquelle des coulées d'air froid vont descendre vers les zones urbanisées en aval. Pour bien distribuer le potentiel de cette source froide, il faut créer des corridors à partir de cette zone végétale vers les quartiers urbains denses. La ville de Stuttgart en Allemagne, située dans une vallée peu ventée, est implantée de manière à profiter des brises générées par la topographie. Un système de larges corridors ouverts dirige l'air refroidi vers les centres denses ; leur largeur est généralement d'au moins 100m. Ces corridors relient les zones rurales ainsi que des zones de parcs sur les flancs de collines aux zones urbaines. Les constructions sur ces pentes végétales et dans les corridors verts sont régulées strictement. A l'intérieur de la ville, des parcs sont connectés à ces canalisations d'air frais, fournissant des sources locales de refroidissement pour les quartiers (Brown & DeKay 2001). Ces corridors de ventilation offrent en plus un tracé privilégié pour des allées piétonnes et des pistes cyclables.

Même si on a dit que la température de l'air en ville est généralement homogène par quartier morphologique, il est possible d'avoir des poches de surchauffes ou de fraîcheur dans les endroits dits confinés, c'est-à-dire dans les lieux où l'échange entre l'air de ce site et l'air extérieur est réduit. L'aspect confiné d'un lieu dépend surtout de son rapport H/W ainsi que de la position des ouvertures de l'espace par rapport au vent. Ainsi, les pergolas ou des plantations dont le feuillage couvre la presque totalité de l'espace d'une cour ou d'une place relativement confinée servent de séparation entre l'air au-dessus et en dessous de son feuillage. Cette séparation permet de conserver la fraîcheur à l'intérieur d'un espace urbain. Des auvents peuvent également jouer ce rôle de séparateur de l'air pour favoriser un microclimat spécifique.

Pour augmenter localement la température de l'air d'un site confiné, il faut :

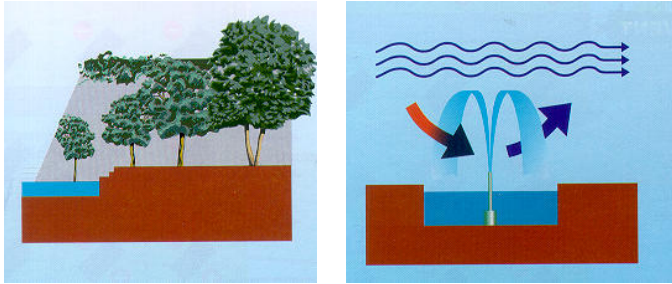
- optimiser l'exposition solaire du site (ouverture privilégiée du sud-est au sud-ouest).
- fournir des protections contre le vent pour écarter les vents froids des espaces publics et des bâtiments.
- utiliser des matériaux à forte inertie (béton, maçonnerie) et de couleur foncée sur les surfaces situées du sud-est au sud-ouest.
- utiliser des matériaux à capacité thermique et à albédo faible (par exemple du bois) pour le mobilier urbain et les zones de sol appropriables par les utilisateurs de l'espace, car ils conservent une sensation de chaleur au toucher même lorsque les températures sont relativement basses.

Pour diminuer localement la température de l'air d'un site confiné, il faut :

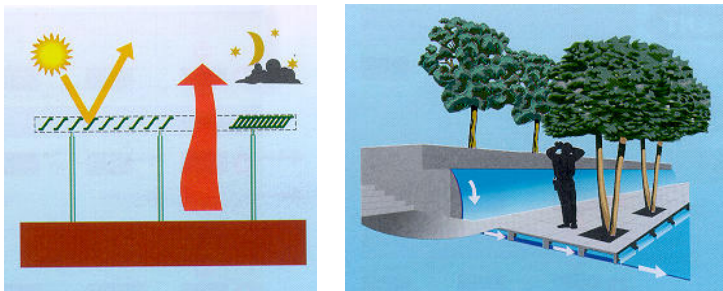
- ombrager les surfaces,
- utiliser une couverture végétale extensive. La température de surface de la végétation reste basse grâce au processus d'évapotranspiration.
- ventiler l'espace public,
- favoriser le refroidissement par évaporation (fontaines, bassin, végétation,...).
- utiliser des matériaux dont la capacité thermique est forte (maçonnerie, béton,...) et l'albédo élevé (couleurs très claires) pour les surfaces ensoleillées.

L'inertie d'un bassin d'eau dépend directement de sa masse et donc de sa profondeur. En revanche, l'évaporation dépend de la surface de contact entre l'eau et l'air. C'est la raison pour laquelle les jets d'eau, fontaines, cascades, etc produisent une baisse importante de température car ils induisent des gouttes dont le diamètre n'est que de quelques millimètres. Lorsqu'on utilise des pulvérisateurs

de micro-gouttelettes (de diamètre inférieur ou égal à 1mm), le refroidissement est encore plus efficace. En effet, au plus les gouttes sont petites, au plus la surface de contact air-eau est grande et donc l'évaporation augmente.



Les deux graphes suivants montrent comment des technologies adaptées peuvent aussi traiter ce problème de température de surface trop élevée. Le graphe de gauche propose de placer des ombrages amovibles afin d'ombrager le sol en journée mais de le laisser se refroidir par rayonnement vers le ciel en soirée. L'image de droite montre que l'eau peut aussi refroidir le sol en circulant en dessous de celui-ci.



Ainsi, les espaces confinés permettent de créer des ambiances thermiques spécifiques alors que les grands espaces ouverts restent très dépendants de la température du vent.



Louvain-la-neuve : haies et murets qui créent des espaces confinés visuellement ou thermiquement selon leur hauteur. (Photo : S. Reiter).

Il est également utile de créer des espaces de transition entre des sites dont les ambiances microclimatiques sont très différentes. Des espaces tampons, tels que des galeries couvertes, sont par exemple très favorables pour diminuer les différences de température trop importantes entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.

Les espaces partiellement fermés sont des espaces publics spécialement intéressants du point de vue microclimatique. Des études basées sur des tests in situ en Angleterre et en Grèce montrent que dans ces deux types de climats fort différents, les arcades, galeries, marchés couverts et autres types d'espaces partiellement fermés génèrent un microclimat local intermédiaire entre les espaces extérieurs totalement ouverts et les espaces situés à l'intérieur des bâtiments (Sinou & Steemers 2004).



(Photo : S. Reiter).

Ainsi, les espaces partiellement fermés (arcades, galeries, marchés couverts,...) créent des espaces tampons qui limitent la consommation d'énergie des bâtiments qui les jouxtent et assurent des espaces publics relativement protégés du climat extérieur en comparaison des espaces ouverts (rues, places, parcs). Ils génèrent donc des espaces où les personnes peuvent expérimenter des conditions de confort thermique extérieure supérieures à des espaces totalement ouverts, tout en offrant les mêmes bénéfices sociaux que les autres types d'espaces publics extérieurs. Dans les pays chauds, ils protègent une zone de l'ensoleillement direct tandis que dans les climats tempérés froids, ils permettent au contraire à cette zone d'être protégée des intempéries. Ils servent d'espace de transition du point de vue thermique pour les personnes qui vont de l'intérieur d'un bâtiment vers l'extérieur ; ils facilitent donc l'adaptation des citoyens au climat extérieur.

Enfin, ces espaces partiellement fermés assurent une diversité et une variabilité des conditions thermiques extérieures. Ils participent donc activement à la création d'un environnement urbain divers et confortable, indispensable pour le confort psychologique des piétons. Ils apportent également une séparation claire par rapport à l'espace du trafic routier, un agrandissement de l'espace piétonnier sans diminuer fortement les surfaces constructibles et souvent sont dimensionnés à l'échelle humaine. Ils unifient différents bâtiments et peuvent donc servir de trait d'union entre des composants divers de l'espace public. Ils améliorent donc la cohérence de l'espace public.

Les résultats de monitoring réalisés à Cambridge (Sinou & Steemers 2004) montrent que les espaces partiellement fermés restent plus chauds en hiver durant la majorité des heures, permettant donc une occupation plus longue et plus confortable. En été, ces mêmes espaces restent plus froids pendant la journée et plus chauds pendant la nuit, ce qui favorise également leur utilisation et leur appréciation.

Rappelons que les espaces partiellement fermés ont généré de multiples exemples historiques fascinants à travers toute l'Europe. C'est donc à regret qu'il faut constater que l'architecture contemporaine semble abandonner des espaces de grande qualité du point de vue climatique et social.

Les dimensions idéales d'une colonnade dépendent de la latitude où elle sera implantée. Ainsi à Bruxelles (50°N), la largeur optimale du passage couvert serait de 0.6 à 1.4 fois sa hauteur, en considérant que l'espacement entre les colonnes soit égal à la hauteur du passage. Au niveau de la lumière diffuse, l'éclairement naturel diffus juste à l'intérieur du passage sera de 50% inférieur à celui reçu à l'extérieur de la colonnade. Le rayonnement solaire diffus est réduit de 75% à une distance intérieure de 0.4 fois la hauteur de la galerie et de 90% à une distance de 1.2 à 1.4 fois la hauteur de la colonnade. (Littlefair & al 2000)

L'orientation d'une galerie a aussi de l'importance sur les zones d'ensoleillement direct. Par contre, elle modifie peu le rayonnement solaire diffus reçu puisque celui-ci provient de la totalité de la voûte céleste. Bien entendu la latitude du lieu où la colonnade sera construite est le premier élément à prendre en compte. Au latitudes basses, l'effet de protection solaire de la colonnade est encore accentué puisque l'altitude solaire est plus élevée. A la latitude de Séville (37°N), la distance intérieure d'une galerie à partir de laquelle le rayonnement solaire direct est pratiquement complètement bloqué en juin est 0.4 fois la hauteur de la galerie, pour une façade orientée vers le sud. Le rayonnement solaire de mars est arrêté à une distance de 0.8 fois la hauteur de la galerie et le rayonnement de décembre à une distance de 1.6 fois sa hauteur. Donc, pour Séville, la largeur idéale d'une galerie serait entre 0.8 et 1.6 fois sa hauteur afin d'éviter le rayonnement solaire en été et au printemps.

Notons également que les galeries et colonnades offrent généralement un espace protégé du vent et limitent les échanges par rayonnement et par convection par rapport à une rue ouverte. De plus, les zones couvertes offrent une protection par rapport aux intempéries. Ce sont donc des lieux spécialement confortables pour le confort d'hiver dans nos régions.

En plus de fournir une vue agréable et d'apporter un caractère naturel à un espace public, la végétation peut influencer fortement le microclimat local : elle crée de l'ombre, sert de brise-vent et refroidit la température de l'air par évaporation pendant les chaudes journées d'été. Les zones plantées permettent aussi à l'eau de pluie de pénétrer dans le sol et d'alimenter les nappes phréatiques. Les opportunités pour intégrer la végétation dans le développement urbain sont nombreuses : dans les espaces publics et semi-publics (places, cours, squares, passages, arcades, ...), dans les jardins privés, le long des routes, rues pavées, rues piétonnes, au centre des routes à grand trafic et autoroutes, en toiture, pergolas, toitures plantées et façades plantées. La végétation, qui est perméable à l'air, est idéale pour servir de brise-vent car elle crée moins de turbulence que les murs ou parois totalement fermées à l'air. Pour les espaces verts et les arbres implantés en milieu urbain, il est indispensable de choisir soigneusement l'espèce utilisée. En général, les espèces indigènes sont plus résistantes et plus économiques à l'entretien.

Pour le confort et la sécurité des piétons par rapport au vent, il est nécessaire :

- de protéger les places des vents froids et dominants.
- d'éviter que les bâtiments ne génèrent des survitesses inacceptables pour le confort des piétons. Les bâtiments très élevés sont à proscrire des centres urbains. Il faut prévoir des hauteurs de bâtiments relativement homogènes, c'est-à-dire créer des zones de transition pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.
- de favoriser les possibilités de ventiler l'espace pour évacuer la pollution et rafraîchir l'ambiance en été. On peut par exemple profiter de la topographie et de la végétation pour guider les vents et permettre une

ventilation naturelle des espaces publics. En ville, le vent est plus souvent problématique à cause de son absence qu'à cause de sa présence, sauf pour des configurations de bâtiments élevés.

- disposer les îlots urbains en quinconce en bordure de la zone urbaine dense, sur une bande large de 200m.
- prévoir des places et des espaces verts de dimension moyenne ($S < 40\,000\text{ m}^2 = 200 \times 200\text{m}$).
- planter les rues de grande longueur en bordure de la zone urbaine dense, afin de profiter de l'effet de protection de la végétation.
- placer des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) sur les places et dans les parcs de grande dimension ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$), afin d'y ralentir l'écoulement du vent

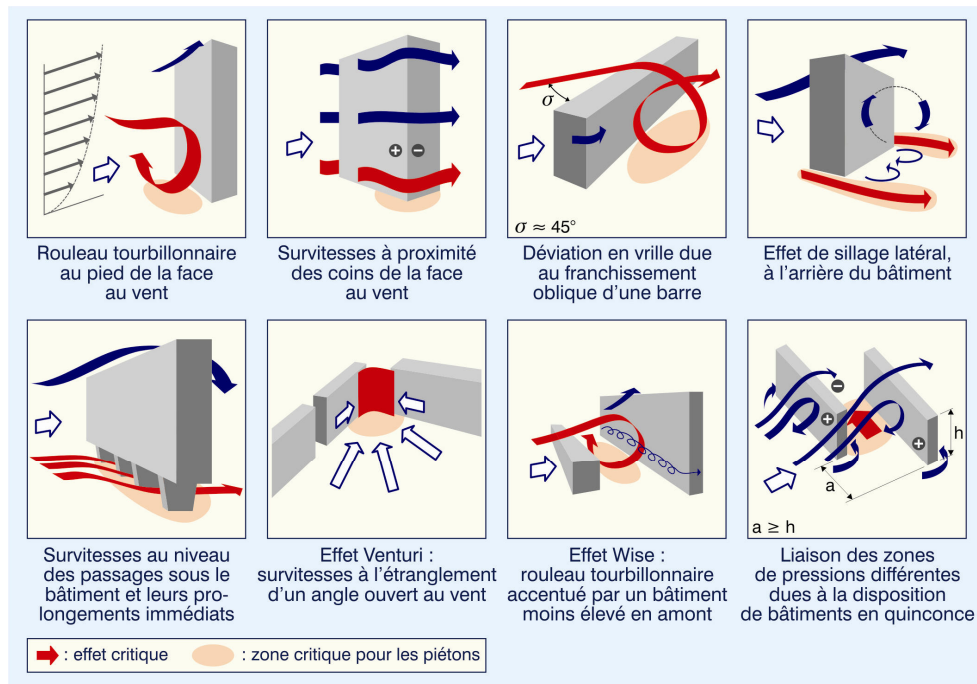
Pour le confort des piétons, les tissus denses de hauteur homogène relativement faible, tels que les centres des villes traditionnelles, assurent globalement un excellent confort au vent. En effet, lorsque les bâtiments d'une ville sont approximativement de la même hauteur, il y a une séparation entre le flux d'air au-dessus des bâtiments et l'air qui circule dans les rues. Les quelques accidents aérodynamiques à craindre se situent alors à la périphérie et dans les zones très dégagées. Cependant, les villes contemporaines présentent des constructions très élevées qui entraînent des rafales de vent inacceptables au niveau piéton. Il est indispensable d'étudier l'impact du vent au niveau du sol pour des bâtiments dont la hauteur est supérieure ou égale à 40m mais il est prudent d'étudier cet aspect dès qu'un bâtiment de 15 à 40m de haut présente une hauteur au moins égale au double de la hauteur moyenne de son environnement bâti.

Les bâtiments très élevés et les activités humaines qui nécessitent un certain confort piéton sont difficiles à concilier. Il faut donc éviter de construire des bâtiments élevés, surtout à proximité des places publiques. L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible ($H/h_{\text{moyen}} > 2$) crée des zones d'inconfort dans les rues adjacentes et accroît les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé. L'intensité des survitesses au niveau piéton dépend essentiellement du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h .

Lorsqu'un projet présente des risques d'inconfort au niveau piéton à cause du vent, il faut évaluer le projet en fonction des différents mécanismes critiques d'écoulement du vent suivants :

- l'effet de coin
- l'effet de cisaillement
- l'effet de trous sous immeubles
- le rouleau tourbillonnaire
- l'effet de barre
- l'effet Venturi
- l'effet Wise
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce
- l'effet de canalisation linéaire

En milieu urbain, ces effets apparaissent à la base des bâtiments dont la hauteur est nettement plus élevée que le plan masse moyen et au pied des ensembles de tours.



Voici quelques règles de bonne pratique qui permettent d'atténuer le problème, lorsqu'un de ces écoulements critiques apparaît dans le projet:

- diminuer la hauteur du bâtiment élevé, afin de diminuer le rapport H/h entre la hauteur de ce bâtiment et la hauteur moyenne du tissu urbain,
- réduire la hauteur des bâtiments le long des espaces publics, surtout à proximité des coins ou des passages sous immeuble.
- créer des décrochements progressifs à partir du cinquième étage (gradins), pour profiter de l'effet de pyramide.
- ceinturer les bâtiments élevés par des constructions plus basses: socle, rez-de-chaussée créant une avancée, galerie fermée, ...,
- densifier le voisinage immédiat du bâtiment élevé par des bâtiments moins élevés,
- créer une maille la plus continue possible, en construisant des murs ou des barrières végétales là où aucun bâtiment ne peut pas être construit.
- éviter les larges façades faisant face au vent dominant, orienter de préférence l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents les plus fréquents,
- pour les bâtiments élevés avec trou sous immeuble, orienter le bâtiment de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport aux façades au vent percées par un passage sous immeuble ou générant un effet de double coin. L'orientation idéale correspond à un vent parallèle à la façade percée par le passage pour piétons.
- pour les bâtiments élevés formant un effet Venturi, orienter le bâtiment de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit parallèle à un des bras du collecteur d'un Venturi. Eviter absolument l'orientation où la bissectrice de l'entonnoir correspond aux vents dominants.
- prévoir des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) près des coins, des passages sous immeuble ou des passages entre bâtiments rapprochés ainsi que dans la zone de cisaillement d'un bâtiment élevé et l'entonnoir d'un Venturi.

- augmenter la rugosité des façades par de larges débords (balcons de 6m de profondeur,...) sur toute la façade au vent du bâtiment.
- augmenter la porosité du bâtiment (trous dans les façades,...),
- couper les angles du bâtiment élevé à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau du coin.
- protéger les balcons situés aux coins des bâtiments.
- créer un couloir de déviation du vent au-dessus d'un passage piétonnier sous immeuble.
- éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons.
- enterrer un espace public.
- diminuer la longueur des bras d'un Venturi pour que la somme de leur longueur totale reste inférieure à 100m. Une possibilité est de créer des bras poreux en introduisant des séparations d'une longueur supérieure à la largeur moyenne des bras du Venturi.
- décaler les bâtiments formant un Venturi de manière à ce qu'un des bras dépasse largement derrière la zone resserrée.
- Pour un bâtiment élevé générant un effet Wise, diminuer la longueur du bâtiment élevé, augmenter la taille du petit bâtiment ($h \geq 0.6 H$) ou augmenter l'inter-distance entre les deux bâtiments ($W \geq 2 H$).
- rapprocher les bâtiments en quinconce pour que la largeur de la surface au vent non commune aux bâtiments soit inférieure à la hauteur des bâtiments en quinconce.
- entraver l'écoulement dans les couloirs de liaison entre des bâtiments en quinconce en l'élargissant ($d > h$), à l'aide de décrochements ou en le rendant poreux.
- diminuer la longueur des canalisations linéaires à proximité des bâtiments élevés ou les orienter de manière perpendiculaire par rapport aux vents dominants.

Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Les problèmes sont souvent déplacés et non supprimés lorsque le champ de pression autour du bâtiment n'est pas modifié substantiellement. Pour les bâtiments très élevés, la meilleure forme pour la protection au vent est toujours celle qui minimise sa hauteur. Gardons toutefois en mémoire deux conseils généraux par rapport à l'application des brise-vent en milieu bâti (Gandemer & Guyot 1981):

- privilégier la protection d'un secteur conduit généralement à la détérioration d'un autre. Il est donc important de choisir les zones où le confort au vent est le plus indispensable et reporter le vent vers les zones où les critères de confort ne sont pas aussi importants.
- Plus la zone est exposée ou l'anomalie aérodynamique est élevée, plus l'efficacité relative de l'action du brise-vent sera grande.

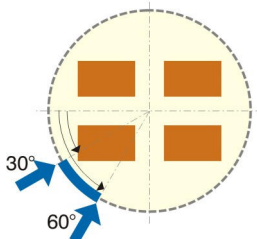
Dans les grands ensembles de bâtiments élevés, les risques d'inconfort pour les piétons sont toujours élevés.

Il faut toutefois faire attention qu'un excès de protection au vent peut rendre l'air des villes irrespirable. Dans tous les climats, les espaces publics qui subissent des sources de pollution locales (trafic,...) doivent être assez larges pour permettre au vent de disperser la pollution. Les rues de nos urbanisations sont polluées au niveau

du sol par les véhicules à moteur et à hauteur des toits par les cheminées. Pour assurer le confort respiratoire, il est important de limiter la circulation des véhicules à moteur, de profiter de la capacité du vent à disperser les polluants et d'introduire de la végétation en ville. Il faut également dimensionner des hauteurs de cheminées suffisamment hautes pour empêcher que le vent ne redirige la pollution générée en toiture vers le sol.

La géométrie urbaine affecte la capacité de la ville à disperser les polluants produits au niveau de la rue et des toitures :

- la rugosité de surface de la ville affecte la turbulence mécanique produite et la forme du profil de vent vertical. La rugosité du milieu urbain dépend à la fois de sa densité et du type de groupement des bâtiments. La rugosité maximale et donc la ventilation maximale, correspondent à une densité du bâti de 0.2 à 0.25.
- la géométrie des rues détermine la profondeur de la zone de dispersion des polluants. Il s'agit non seulement de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur espacement mais aussi de l'orientation des rues principales par rapport aux vents dominants. Pour que le vent assure en permanence une ventilation de l'espace public, le rapport H/W devrait rester en-dessous de 0.65. Au-delà et pour des rapports H/W de l'ordre de 1 à 1.5, il faut qu'il y ait des vitesses de vent d'au moins 2m/s au niveau des toitures pour qu'une ventilation des rues soit possible. Pour la dispersion des polluants, les rues devraient idéalement se situer dans un angle de 30° à 60° par rapport aux vents dominant. En effet, les rues parallèles au vent propagent la pollution à l'intérieur de la rue sur de longues distances avant de la disperser et les rues perpendiculaires au vent créent généralement des poches d'air où la pollution peut stagner sauf si ces rues sont très larges.



- l'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain. La hauteur au vent des bâtiments qui sont supérieurs à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments influencent la dispersion des polluants autour de ceux-ci. Des différences de hauteurs raisonnables peuvent à la fois favoriser la dispersion des polluants tout en conservant le confort des piétons du point de vue de l'effort mécanique du vent.
- l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

Une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.7$ associée avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30° à 60° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

Nous proposons de créer des variations moyennes de la hauteur du bâti, d'une hauteur égale à 1.5 ou 2 fois la hauteur moyenne des bâtiments, ce qui est très bon pour la ventilation et la dispersion des polluants, sans générer de problèmes pour le confort au vent des piétons. De plus, cela apporte de la diversité dans la ville,

créant des rythmes et la possibilité de repères visuels tout en évitant des inconforts excessifs.

Signalons que la végétation peut aussi aider à remédier au problème critique de la pollution de nos agglomérations. Les arbres ont un effet d'oxygénation sur leur entourage et ils sont capables de filtrer les poussières en suspension. De plus, les zones vertes de grande taille peuvent générer des courants d'air thermiques entre leurs surfaces végétales et les zones urbanisées. Ces mouvements d'air participent à la diminution de la pollution urbaine.

Dans les zones où les problèmes de pollution sont graves, il faut étudier l'éventuelle possibilité de créer des tours de ventilation (réappropriation de la technique des tours à vent des pays ensoleillés). Créer un mouvement d'air vers le haut devrait permettre d'évacuer l'air surchauffé, les polluants et fumées émises au niveau de la rue. Le sommet des tours à vent est généralement couvert d'une plaque de métal noire et inclinée afin d'assurer un échauffement rapide de l'air situé juste en dessous. Comme alternative, on pourrait aussi utiliser un panneau photovoltaïque, qui pourrait éventuellement alimenter une ailette qui assurerait le relais si nécessaire.

Dans les pays fortement pluvieux, il est nécessaire d'offrir des espaces et des parcours extérieurs couverts. Pour se protéger de la pluie, les arcades et les galeries couvertes sont des éléments essentiels pour une conception microclimatique de qualité. Ainsi, en Belgique, les auvents et galeries sont toujours bienvenues pour nous protéger des intempéries. Notons que la protection par rapport aux intempéries devient un élément réellement critique de la conception des espaces publics dans les climats froids (chutes de neige,...). Il est important de protéger les édifices et les lieux de détente de la neige. Dans les climats froids, une architecture spécifique est créée pour tenir compte de ces besoins de protection par rapport aux précipitations. Le principe de base est que la neige se dépose et s'accumule là où il y a une bonne protection au vent.

Pour le développement durable des villes, il est important de promouvoir des aménagements urbains qui réconcilient l'eau et la ville. Il s'agit d'abord de promouvoir une nouvelle « culture urbaine » de l'eau reposant sur différents principes :

- reconsidérer les fonctions urbaines de l'eau (élément d'aménagement urbain, élément de sociabilité, développement économique local lié aux activités associées à l'eau, potentiel symbolique,...),
- développer et utiliser les techniques alternatives qui s'opposent au principe du « tout à l'égout » et essaient de se rapprocher le plus possible du cycle naturel de l'eau en absence d'urbanisation. Ces techniques sont par exemple les tranchées drainantes, les chaussées à structure de réservoir, le stockage en toiture, les bassins de retenue, les puits d'infiltration, etc.
- mieux gérer les risques mineurs et majeurs des inondations. La prise en compte de ces événements exceptionnels constitue un devoir pour l'aménageur. Les recherches et solutions pour les débordements des rivières existent et sont appliquées. En revanche, les recherches sur les solutions pour les inondations dues à des ruissellements superficiels sur les surfaces urbaines sont moins avancées et plus difficiles à appliquer. Pourtant, cette protection contre les risques mineurs peut également être assurée par des solutions techniques. Les techniques alternatives intégrées à l'urbanisation retardent le transfert de l'eau vers les exutoires de surface

et accélèrent son évacuation vers les exutoires souterrains : elles réduisent très significativement les pointes de débit.

- Gérer intelligemment l'eau par sa prise en compte dans les documents d'urbanisme prévisionnel et opérationnel : repenser les découpages techniques et administratifs. Les principaux freins à une gestion durable de l'eau en ville ne sont pas techniques. La réussite du développement de ces nouvelles solutions nécessite surtout de changer d'attitude par rapport à l'eau. Le cycle de l'eau doit être considéré dans son ensemble. Les découpages territoriaux de nature administrative doivent s'estomper devant des découpages correspondant mieux à la réalité de la gestion de l'eau (par « bassin hydrologique » par exemple).

Il est indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit. La première action à poser est donc de permettre aux eaux de pluies de s'infiltrer dans le sol, le plus rapidement possible pour qu'elles restent propres, afin de continuer à alimenter les nappes phréatiques. Une végétation adaptée retient les eaux de pluies et réduit considérablement le ruissellement. Des revêtements filtrants, des fossés, des puits ou des bassins filtrants permettent également d'éviter le ruissellement en surface.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Ensuite, pour les eaux de ruissellement inévitables, il faut tenter de ralentir leur écoulement vers l'aval afin d'éviter les inondations. Dans ce but, il est nécessaire de générer l'évaporation ou la réutilisation de ces eaux. Le but est de supprimer les canalisations d'eaux pluviales enterrées. Les zones de rétention, bassins d'orages végétalisés, étangs ou canaux aménagés au sein même des quartiers recueillent les eaux de pluie et recréent ainsi des biotopes. L'eau peut s'évaporer via des bassins, des toitures végétales ou des zones plantées. Les eaux de pluie peuvent être mises à profit dans les bâtiments avec ou sans traitement selon le type d'usage désiré. On peut aussi retarder les eaux de pluies vers les égouts en rallongeant le plus possible le chemin de l'eau grâce à des bassins d'orage ou des retenues multiples mais il est indispensable d'éviter le mélange des eaux de pluie et des eaux usées.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Ainsi, la promotion de la perméabilité des surfaces dans les zones urbaines et la séparation du ruissellement des eaux de pluies du système d'égouts pourraient

contribuer à la recharge des nappes d'eau souterraines, à l'abaissement du coût de la collecte et de l'épuration des eaux usées et à la réduction des inondations urbaines.

Un bel exemple de gestion de l'eau en milieu urbain est réalisé dans le quartier Kronsberg à Hanovre. Un système de drainage semi naturel est mis en place afin de reproduire fidèlement l'écoulement naturel des eaux et ainsi limiter l'impact de la construction du quartier sur le cycle de l'eau et les ressources en eau de la région (IMBE 2005). Un réseau de fossés d'infiltration est creusé de chaque côté de la chaussée. Il draine les eaux pluviales des voiries vers des bassins de rétention afin de les filtrer et de les remettre "dans le circuit" (chasses d'eau,...). La municipalité de Hanovre a imposé dans le quartier de Kronsberg l'installation d'un système d'infiltration des eaux de pluie devant chaque propriété avec raccordement à ce réseau de fossés d'infiltration et recyclage. Un premier bilan de la destination des eaux pluviales, au niveau du quartier, montre que 45% s'infiltrent dans le sol, 53% s'évaporent et seulement 2% est rejeté dans les réseaux.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Dans le quartier Vauban, récemment construit à Fribourg, plusieurs solutions sont retenues pour respecter le cycle de l'eau (IMBE 2005):

- toutes les toitures plates sont végétalisées, y compris celles des locaux à déchets.
- des citernes de récupération des eaux de pluie sont installées dans certains immeubles ou dans les locaux à déchets et les abris vélos.
- ces eaux de pluie sont utilisées pour le lavage du linge, pour l'arrosage des jardins et pour les chasses d'eau des toilettes de certains bâtiments (école primaire, habitations,...)
- un système de cuvettes et de tranchées filtrantes permet d'alimenter la nappe phréatique.
- des caniveaux pavés reçoivent aussi bien les eaux de ruissellement des rues que celles des toits, en l'absence de citernes. Le trop plein est dirigé vers un étang et un biotope (bassin d'orage végétalisé).



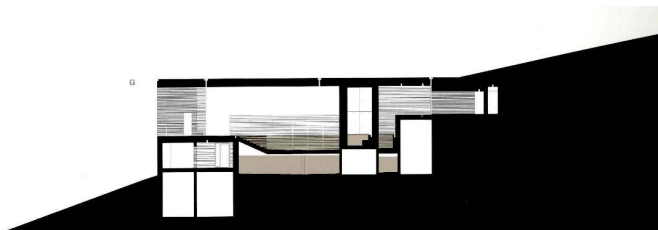
(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

La végétation extensive des toitures est une technique connue et appliquée à grande échelle dans les pays germaniques et scandinaves ; elle consiste à planter une végétation pauvre, supportant l'humidité comme la sécheresse, poussant sur une mince couche de terre de 4 à 10cm, ne nécessitant aucun engrais, arrosage ou fauchage. La pauvreté du substrat évite la croissance exagérée et l'épaisseur de terre faible permet en général de ne pas renforcer les structures portantes. Une couche de 4-10 cm de substrat pour les racines permet déjà de ralentir l'écoulement des eaux et favorise une évaporation progressive de la pluie. Tout en faisant office d'épuration naturel des eaux de pluie, pour leur récupération ou non, cette végétation dépoussière l'air et le rafraîchit quand il fait très chaud. Par opposition à la végétation extensive, la végétalisation intensive des toitures consiste à y créer des toitures jardin où la végétation peut être constituée de gazon, arbres ou arbustes sur une couche de terre allant de 50 à 100 cm. En raison du poids de la terre sur une telle épaisseur, les structures portantes doivent en général être renforcées. De plus, ce type de végétation nécessite un entretien régulier. Mais son côté esthétique et ses valeurs d'agrément pour les utilisateurs de ce jardin suspendu sont toutefois à signaler. (CONVIVE 1995)

La photo et la coupe ci-dessous montrent la toiture plantée du bâtiment des thermes conçu par P. Zumthor à Vals.



Les thermes de Vals (architecte : Peter Zumthor ; photo et coupe : de Myttenaere 2006).

Enfin pour assurer une bonne qualité d'ambiance sonore en ville, il est nécessaire :

- d'opérer un travail de limitation des sources de bruit,
- de limiter la propagation du bruit en milieu urbain,
- de valoriser les qualités sonores du lieu.

Au niveau de l'acoustique urbaine, les politiques de subsides pour l'isolation des façades des logements ne sont encore qu'un palliatif qui ne s'attaque pas à la cause réelle du problème : l'émission de bruit. Nous encourageons donc davantage des

mesures qui consistent à diminuer le trafic urbain et ses multiples nuisances dont le niveau sonore dans les espaces publics. Bien entendu l'isolation acoustique des façades restera dans certains lieux une solution indispensable mais elle devrait être utilisée en tout dernier recours.

Améliorer le confort acoustique en ville peut être mis en œuvre grâce à différents moyens :

- diminuer l'intensité du trafic (rues piétonnes, limitation des parkings en ville, sensibilisation de la population, canalisation du trafic de transit sur quelques grands axes,...),
- diminuer la vitesse des véhicules (aménagement locaux de voiries, zones 30, etc),
- choisir un revêtement de sol peu bruyant,
- augmenter la distance entre la source de bruit et les zones de détente,
- utiliser la continuité du bâti comme barrière acoustique,
- entourer un espace de détente par un ensemble de bâtiments,
- utiliser des éléments sonores agréables (ex : fontaines) comme masques sonores.
- créer des différences de niveaux entre la source de bruit et les espaces de détente.
- ajouter des espaces tampons entre zones acoustiques très contrastées.
- utiliser des matériaux absorbants.

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit. Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

L'utilisation d'un masque sonore est à conseiller pour couvrir un bruit de fond qui ne peut pas être supprimé. L'effet de masque peut aussi être utilisé pour choisir un type d'ambiance sonore agréable : lieu à sonorités naturelles, musicales ou autre.

Il est important de prendre en compte le choix des matériaux de construction pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les matériaux qui entreront dans le projet représenteront chacun un investissement énergétique spécifique en fonction de l'énergie nécessaire pour le produire, de sa localisation,... On privilégiera donc le choix de matériaux de construction locaux, de faible énergie grise et l'utilisation de matériaux recyclables ou recyclés,...

L'espace public comme lieu multifonctionnel nécessite sa réorganisation et son partage. Tous les utilisateurs (piétons, cyclistes, automobilistes, handicapés, personnes utilisant les transports en commun, ...) doivent pouvoir s'y épanouir aussi librement que possible. Partager l'espace public, c'est montrer par des aménagements que les différents utilisateurs de l'espace cohabitent équitablement en donnant une place juste à chacun d'eux. Lors de la conception d'un groupe de bâtiments, d'un lotissement ou d'un quartier, il est possible d'intégrer une réflexion sur les continuités piétonnes et cyclables avec les zones voisines.



(Architecture et Climat 2004).

Il est également important d'améliorer l'ambiance des stations et des arrêts de transports en commun. Il faut également favoriser l'intermodalité entre les transports publics et le vélo, par l'installation de dispositifs pour garer ou consigner les vélos aux arrêts. Tous les équipements destinés à favoriser le transport à pied ou à vélo sont utiles.

Enfin, l'éclairage artificiel des espaces publics est un des domaines qui ouvre à la possibilité de créer des ambiances urbaines de qualité. Il est important de prendre en compte les implications de l'éclairage artificiel des espaces publics sur ses consommations d'énergie, le confort des piétons en soirée ainsi que le sentiment de sécurité qui est conféré à ces lieux. Il est important d'assurer un éclairage artificiel et des équipements urbains peu consommateurs en énergie. L'éclairage des vitrines la nuit et le chauffage des espaces publics bordant des restaurants sont des exemples de pratiques spécialement énergivores.



(Deprez 2003).



(Deprez 2003).

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable permettrait de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluantes. Les énergies renouvelables sont d'autant plus crédibles et rentables que les besoins énergétiques sont faibles.

Conclusion

« On ne résout pas les problèmes avec les modes de pensée qui les ont engendrés. » Albert Einstein.

Ce chapitre de conclusion rappelle les enjeux, la méthode utilisée et la structure de cette thèse de doctorat. Les résultats obtenus tout au long de cette thèse sont résumés et leur caractère innovant est souligné. Des pistes sont lancées pour des recherches ultérieures qui permettraient d'approfondir encore le sujet traité dans cette thèse. Quelques réflexions finales clôturent enfin ce doctorat. Elles mettent en évidence l'importance de recherches multidisciplinaires basées sur une vision holistique pour mieux tenir compte de la complexité des interactions qui relient l'homme à l'univers. Elles rappellent enfin notre responsabilité en tant qu'être humain face à l'évolution de l'humanité sur Terre.

Cette thèse de doctorat consiste à élaborer des outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes.

En ce début de XXI^{ème} siècle, l'urbanisation croissante du monde nous oblige à envisager très sérieusement l'avenir de nos villes. En effet, nos urbanisations représentent fondamentalement les lieux où se jouent des enjeux planétaires cruciaux pour l'avenir de l'humanité, tels que l'exclusion sociale, la dégradation de l'environnement naturel, la pauvreté, ... A l'échelle du quartier, citons quelques problématiques critiques à l'heure actuelle : l'étalement urbain, la mono-fonctionnalité du tissu bâti, la pollution urbaine (atmosphérique, sonore, de l'eau,...), la dissolution de l'espace public, les inégalités sociales, l'appauvrissement des centres-villes, l'accaparement de l'espace public par la voiture, la privatisation de l'espace public, le non respect du contexte local, ... Ces problèmes ne se limitent pas à diminuer notre qualité de vie mais, en outre, hypothèquent gravement le potentiel des générations futures.

La crise actuelle de l'urbain s'inscrit dans une crise générale de notre société où la technologie et la rentabilité financière à court terme sont survalorisées par rapport aux valeurs sociales, environnementales, économiques et éthiques tenant compte de l'évolution à long terme de notre civilisation. Il est désormais indispensable de trouver des solutions qui revalorisent ces différentes dimensions au sein d'un développement équilibré.

La conception d'espaces publics urbains de qualité est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, sociales, environnementales et économiques de nos villes. Ce travail de thèse s'inscrit dans la recherche de nouveaux modes de conception de notre espace habité pour assurer le développement durable des villes.

Au niveau des enjeux globaux du développement durable, la volonté de densifier les zones urbaines est un élément positif pour le développement de l'humanité sur Terre : rassemblement de populations diverses, conservation du paysage naturel, diminution des coûts liés aux infrastructures et aux équipements publics, ... Mais par contre la ville dense engendre de sérieux désagréments au niveau local (risques pour la santé des habitants dus à la pollution accrue, ...). C'est ainsi que le confort

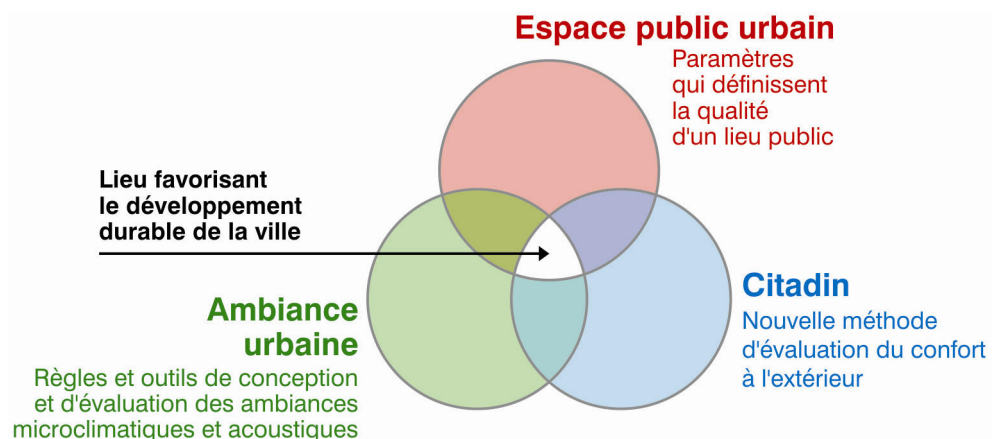
dans les espaces publics urbains devient un élément charnière entre l'enjeu local d'assurer le bien-être des habitants et l'enjeu global de densifier le tissu urbain. Les effets bénéfiques les plus importants d'une conception urbaine tenant compte du confort des personnes sont :

- l'amélioration de la qualité de vie dans les espaces publics en ville (équité sociale, bien-être des habitants,...),
- l'accroissement de l'utilisation des places urbaines (rencontres, mixité de la population, démocratie, ...)
- la diminution des consommations d'énergie liées à l'utilisation des bâtiments (ventilation, ensoleillement des façades...) et de l'espace public (diminution de la circulation automobile, utilisation accrue des vélos et des transports en commun, valorisation du piéton),
- la limitation des nuisances environnementales (diminution de la pollution atmosphérique, amélioration de la santé des habitants...),
- la valorisation de l'image de la ville, pour faire revenir les habitants en ville. Ce critère présente de nombreux avantages sociaux, économiques et environnementaux. Rappelons notamment que le premier facteur d'économie d'énergie est la densité de l'habitat.

Cette thèse représente donc un enjeu important pour favoriser un développement durable de nos urbanisations, équilibrant de manière harmonieuse les bénéfices sociaux, environnementaux et économiques aux différentes échelles

Cette thèse de doctorat propose un éclairage spécifique et technique des ambiances urbaines, tout en l'insérant dans une approche architecturale globale. Elle est centrée sur l'étude des multiples interactions entre la morphologie du tissu urbain, les ambiances urbaines et les citoyens.

Le schéma ci-dessous représente les différents thèmes abordés par cette recherche doctorale.



Dans une première partie, cette thèse étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour promouvoir une conception architecturale et urbaine respectueuse de l'homme et de l'environnement. Dans une seconde partie, ce travail de thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics, selon une approche innovante du confort à l'extérieur qui consiste à regrouper les points de vue physiologiques et psychologiques. Dans une troisième partie, cette

thèse décrit les moyens existants et développe de nouveaux outils méthodologiques et techniques pour concevoir des ambiances urbaines de qualité du point de vue microclimatique et acoustique. L'étude du vent autour des bâtiments y est particulièrement développée. Cette section comprend une validation du logiciel FLUENT pour l'étude du confort par rapport au vent au niveau piéton ainsi que l'élaboration d'outils graphiques quantitatifs d'évaluation des niveaux d'inconfort au vent autour des bâtiments. Ces outils méthodologiques et techniques permettront aux différents acteurs du processus de conception et de réalisation des projets urbains d'identifier dans le tracé de leurs plans masses les zones susceptibles d'être critiques ou clémentes pour les piétons en fonction du microclimat et de l'acoustique.

La conception des ambiances urbaines est un processus architectural qui se situe à la charnière entre différentes disciplines, telles que l'urbanisme, la climatologie, la physiologie et la psychologie. L'approche technologique seule ne permet pas de fonder un projet urbain car elle ignore les fondements culturels et psychologiques indispensables pour créer une architecture de qualité. Chaque partie de cette recherche est étudiée selon une démarche multidisciplinaire et holistique afin d'analyser les ambiances urbaines dans leurs aspects qualitatifs autant que quantitatifs.

Actuellement, l'étude approfondie d'un microclimat urbain requiert l'utilisation de technologies de pointe que sont les outils actuels de simulations des paramètres climatiques. Cependant, ces techniques qui permettent de simuler très précisément le microclimat urbain sont très complexes et demandent aux concepteurs un investissement trop important en temps et en argent pour la majorité des projets. C'est pourquoi cette recherche utilise les outils de simulations contemporains pour déterminer des règles de bonne conception microclimatique et créer des outils simplifiés d'évaluation du microclimat urbain, facilement utilisables par les concepteurs urbains avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné.

Ainsi, ce travail de doctorat utilise deux méthodes de recherche :

- une réflexion basée sur une étude bibliographique étendue et pluridisciplinaire. Cette recherche se fonde sur une approche scientifique rigoureuse.
- des simulations du microclimat urbain. Il s'agit plus précisément de l'étude des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux simulations CFD (computational fluid dynamics) à l'aide du logiciel FLUENT.

La première partie de ce doctorat étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour le développement durable des villes. Cette étude souligne également l'importance du point de vue humain et de son expérience corporelle pour qu'un espace public puisse être approprié, tout en favorisant la création de liens entre l'homme, son environnement et les différentes échelles de l'habiter. Cette recherche a abouti à la définition d'un espace public durable, basée sur trois qualités fondamentales : la contextualité, la coexistence et la cohérence.

S'interroger sur le développement durable urbain consiste à se questionner sur le rapport entre l'être humain et son milieu ainsi que sur les rapports au monde que nos espaces habités peuvent favoriser. Poser la question de l'établissement humain nécessite inévitablement de prendre en compte les trois niveaux de l'incarnation humaine: sa corporéité, sa sociabilité et sa spiritualité. Tout espace bâti se positionne par rapport à ces trois points de vue incontournables de l'expérience sur Terre:

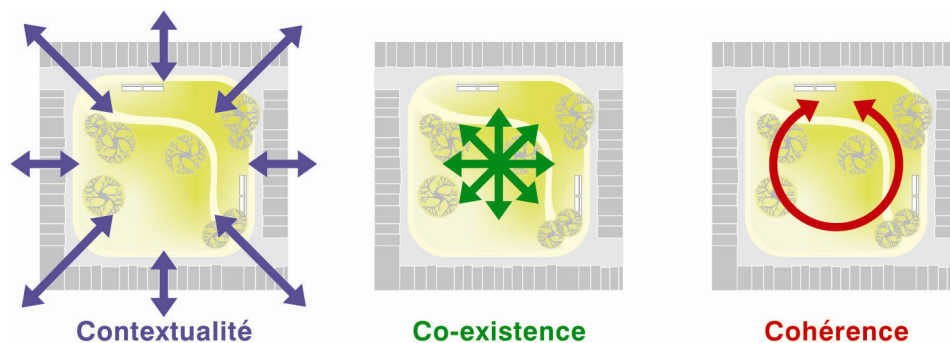
- la corporéité ou enracinement de l'être,
- le domaine relationnel ou mise en relation de l'être,
- la métaphysique ou recherche de sens et essence de l'être.

Il s'agit donc de développer des modes d'habiter qui peuvent faire sens à ces trois niveaux pour l'homme d'aujourd'hui et de demain au regard des enjeux globaux et locaux du développement durable

La situation urbaine contemporaine peut être globalement définie comme une « perte de lieu ». La modernité a tout simplement nié les lieux, ce qui a produit des espaces inhabitables. Créer un espace public durable est pour nous l'art d'offrir à autrui un monde habitable pour pouvoir vivre ensemble et en harmonie avec notre milieu. Tout espace public devrait instaurer un rapport fondamental au monde, à autrui et à soi-même. C'est justement là que se situe la perte de lieu des espaces contemporains, qui peut être interprétée dans les espaces actuels comme une absence d'intégration au contexte local, comme une impossibilité à nous relier et comme un manque de cohérence.

C'est pourquoi nous proposons les trois concepts suivants pour définir les caractéristiques essentielles que doit présenter un espace public durable ou, dit autrement, **les qualités fondamentales de tout lieu public** :

- la **contextualité** (ou inscription dans son milieu),
- la **coexistence** (ou mise en présence dense et complexe des différences),
- la **cohérence** (ou identité porteuse de sens).



Dans cette thèse de doctorat, les principaux enjeux urbains contemporains ont été analysés et expliqués à travers le développement de ses trois principes fondamentaux du développement durable des espaces publics. Chacune de ces trois caractéristiques se définit dans un lieu public selon trois points de vue: quantitatif, qualitatif et dynamique (c'est-à-dire porteur d'une capacité d'évolution).

La contextualité est la mise en relation d'un espace spécifique à son milieu englobant, constitué par un contexte physique, un contexte construit et un contexte humain. La contextualité d'un espace public, ou son inscription dans un milieu, nécessite :

- son intégration grâce aux continuités, au respect de la mémoire des lieux, à la création d'espaces de transition entre les différentes échelles, ... Pour s'intégrer dans son milieu, l'espace public doit profiter des opportunités offertes par le milieu et se protéger des contraintes du milieu, aux différentes échelles de l'habiter.
- sa participation. Un lieu public apporte des bénéfices au milieu dans lequel il s'inscrit et le protège de toute nuisance qu'il pourrait induire, aux différentes échelles de l'habiter. Cette participation induit donc une

éthique, qui vise à établir une justice intergénérationnelle en poussant les habitants à prendre conscience de leur responsabilité face au Monde et à l'Histoire. « J'ai droit à la ville » se transforme en « je suis responsable de la ville ».

- son adaptabilité. S'inscrire dans un milieu c'est aussi être capable d'évoluer en même temps que ce milieu.

Par la rencontre de l'altérité, le lieu public devient le lieu privilégié de la mise en présence dense et complexe des différences, accès indispensable au vivre ensemble. La coexistence, qui définit le lieu public comme une identité collective, est créée à partir de trois qualités complémentaires :

- le rassemblement qui nécessite de la proximité et une certaine densité. Les espaces collectifs sont des lieux où les hommes sont réunis pour vivre ensemble.
- la diversité : variété de lieux, mixité des fonctions, hétérogénéité du bâti, simultanéité ou succession des activités,... La multiplicité sous toutes ses formes est nécessaire.
- l'ouverture, comme disponibilité à la transformation et à l'appropriation, tolérance de l'autre, libre accès, possibilité de laisser advenir... La complexité, l'hétérogénéité, les paradoxes, les incertitudes, les ambiguïtés sont des caractéristiques qui ouvrent à la liberté, à la possibilité de choisir et d'agir.

L'espace public ne crée un lieu public que dans la mesure où s'induit à son propos un processus d'identification collective. Un lieu public est alors perçu comme une unité spécifique, dotée d'une singularité qui la distingue de tout autre espace public. Le lieu public est une totalité hautement complexe. Sa cohérence, qualité qui le définit comme une identité singulière, se fonde sur :

- son identité, c'est à dire une unité ordonnée qui assemble ses parties de telle sorte que les tensions s'équilibrent (unité basée sur une hiérarchie, des limites, une orientation, une durée,...).
- son sens, qui révèle des valeurs, des symboles, une esthétique spécifique.
- sa naturalité, comme capacité d'émergence et d'intégration des différentes échelles de son être.

Ainsi, notre réflexion se propose de considérer le lieu public comme une identité à la fois singulière, collective et inscrite dans un milieu.



Selon notre définition du lieu public, pour être durable un espace public doit donc :

- **s'inscrire dans son milieu, c'est-à-dire s'intégrer, participer et s'adapter.**
- **offrir la possibilité de coexister dans la différence, c'est-à-dire rassembler, offrir de la diversité et ouvrir à l'altérité.**
- **créer un lieu cohérent, c'est-à-dire révéler une identité, donner sens et favoriser la naturalité.**

La création d'un lieu public réside dans l'équilibre entre ces neuf principes de conception, qui s'affirment en se limitant et en se complétant l'un l'autre. Cette stratégie de conception et de rénovation des espaces publics a été largement illustrée par de nombreux exemples concrets d'espaces publics belges et européens.

Il faut signaler que le concept de « développement durable » est sans cesse utilisé à l'heure actuelle mais peu de centres de recherche se sont penchés sur la définition d'un urbanisme durable au-delà de la question de la mobilité. L'importance de l'espace public urbain comme enjeu du développement durable et la définition des critères de conception d'un espace public durable sont des nouveaux thèmes de recherches.

Dans une seconde partie, cette thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics. La majorité des études réalisées sur le confort portent uniquement sur les conditions intérieures et les quelques recherches qui ont été abordées pour étendre les critères de confort à l'extérieur sont très souvent des approches purement physiologiques. Il est toutefois évident qu'on ne peut pas évaluer de manière identique le confort à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Tout d'abord, les trois paramètres climatiques principaux à l'extérieur (le rayonnement solaire direct, le vent et la pluie) sont exclus des études réalisées à l'intérieur. De plus, le comportement psychologique des personnes face aux conditions environnantes est très différent à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Les espaces extérieurs présentent peu de contraintes. Les personnes qui s'y arrêtent y sont de par leur propre choix. Il serait toutefois erroné de conclure que le confort à l'extérieur n'est pas important alors que les études présentées dans cette thèse montrent clairement que les conditions environnementales influencent fortement l'utilisation des espaces publics. La qualité des ambiances urbaines participe largement à l'évaluation positive ou à la dépréciation des caractéristiques du site. De plus, la perception du confort possible détermine le fait de sortir à l'extérieur et l'impression de confort ressentie motive à s'arrêter dans un espace plutôt que de le traverser. Cependant, lorsque quelqu'un a décidé de sortir et de s'asseoir dehors, il s'est préparé à s'accommoder aux conditions extérieures. C'est là que l'adaptation psychologique prend toute son importance. En fait, à l'extérieur des bâtiments, les êtres humains évitent l'inconfort mais ne recherchent pas spécialement un équilibre physiologique optimal.

Le confort dans les espaces publics est vécu comme une sensation globale de bien-être ou d'inconfort, ce qui engendre une difficulté à percevoir d'où vient la cause d'une insatisfaction. Le confort extérieur est aussi bien influencé par des éléments physiologiques que psychologiques. Une approche uniquement quantitative est donc insuffisante pour décrire les conditions de confort à l'extérieur. Dans cette thèse de doctorat, nous avons mis au point **une méthode d'évaluation du confort**

dans les espaces publics urbains réunissant les approches physiologiques et psychologiques, à l'aide de critères quantitatifs et de critères qualitatifs.

Cette nouvelle approche du confort dans les espaces extérieurs a pour but d'optimiser le confort des personnes dans les espaces publics grâce à la prise en compte du point de vue humain du confort en plus de ses aspects techniques. Cette démarche est résolument innovante.

Une conception prudente et étudiée des ambiances urbaines peut fournir une protection contre les aspects négatifs et une exposition aux aspects positifs de l'environnement climatique et sonore en milieu urbain, pour la majorité des utilisateurs pendant la plus grande partie du temps. Ce doctorat permet d'affirmer que la conception d'un projet urbain de qualité du point de vue des ambiances urbaines doit intégrer la question du confort humain à travers une évaluation quantitative de l'équilibre thermique des piétons, de l'effet mécanique du vent, de la qualité de l'air, du niveau sonore, de la luminance des surfaces et de l'intensité des intempéries ainsi qu'une évaluation qualitative des critères qui influencent l'adaptabilité psychologique des piétons, afin de tirer les conclusions les plus judicieuses de cet ensemble de critères pour améliorer les possibilités de confort des piétons dans les espaces publics.

Pour déterminer les critères quantitatifs et les critères qualitatifs du confort extérieur, nous avons réalisé de multiples comparaisons entre les critères de confort présents dans la littérature et les nombreuses études expérimentales et in situ du comportement des personnes en relation avec les paramètres environnementaux. Nous avons d'abord analysé, adapté et choisi différents critères physiologiques du confort des piétons. Notre étude a permis de constater que les critères physiologiques du confort des piétons doivent être définis séparément en fonction des différents types de confort: confort thermique, confort par rapport au vent, confort respiratoire, confort acoustique, confort visuel et confort par rapport aux intempéries. En revanche, les aspects qualitatifs du confort humain sont identiques pour ces différents types de confort physique.

Les paramètres physiologiques du confort thermique sont la température, la vitesse de l'air, le rayonnement, l'humidité relative, l'habillement des citadins et leurs activités. Notre point de vue est qu'une détermination trop complexe du confort thermique quantitatif à l'extérieur est inutile à cause de l'importance des processus d'adaptation psychologique qui modifient largement la sensation de confort perçue. Deux méthodes intéressantes doivent être signalées : celle d'Olgyay parce qu'elle est très expressive de par sa présentation graphique et que son évaluation est très rapide et surtout celle de Brown et Gillespie, que nous avons adaptée pour offrir un calcul simplifié mais détaillé du bilan thermique d'une personne, qui fait intervenir les paramètres urbanistiques (facteur de vue du ciel, albedo des surfaces,...). Ces deux méthodes permettent de déterminer rapidement les paramètres à modifier pour améliorer une situation spécifique.

Pour l'inconfort par rapport au vent, nous avons opéré un choix de critères de confort et d'insécurité parmi un très grand nombre de critères présentés dans la littérature. La règle la plus importante à retenir est la suivante : la vitesse moyenne de l'air doit être inférieure à 5m/s sur l'ensemble de l'espace public pendant la plus grande majorité du temps ($U \leq 5\text{m/s}$). Pour une étude plus précise, notre choix se porte sur les deux critères scientifiques suivants :

- limite du confort : $P(U + \sigma_u > 6\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, avec U vitesse moyenne horaire à 1.5 m du sol et $U + \sigma_u$ est la vitesse de vent effective. P_{max} est

une probabilité maximale de 5% pour un long séjour immobile, de 10% pour un court séjour immobile et de 15% pour flâner.

- limite de danger : $P(U + 3 \sigma_u > 20\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, où $P_{\text{max}} = 1 \text{ heure/an} = 0.01\%$. Le terme $U + 3 \sigma_u$ correspond à la vitesse de vent effective pour une turbulence maximale mesurée en une heure par moyennes de 3 secondes de mesures.

Il faut toutefois garder à l'esprit que si le confort des piétons lié à l'effet mécanique du vent nécessite que les vitesses de vent ne soient pas trop fortes ($U \leq 5\text{m/s}$), une bonne ventilation des rues pour assurer la qualité de l'air et leur confort respiratoire demande une vitesse de vent minimale de 2m/s au-dessus des toits.

Par ailleurs, la pollution atmosphérique ne devrait pas dépasser les seuils suivants afin de respecter le confort respiratoire des citoyens.

Polluant	Type de concentration	Valeur de la norme
SO ₂	Horaire	350 µg/m ³
	Journalière	125 µg/m ³
NO ₂	Horaire	200 µg/m ³
	Annuelle	40 µg/m ³
PM10	Journalière	50 µg/m ³
	Annuelle	20 µg/m ³
Pb	Annuelle	0.5 µg/m ³
O ₃	8h-max	120 µg/m ³
CO	8h	10 µg/m ³
Benzène	Annuelle	5 µg/m ³

Du point de vue quantitatif de la gêne sonore en ville, les niveaux sonores équivalents ($L_{\text{Aeq},8\text{h}}$) doivent être strictement limités dans les espaces publics à une valeur de 65 dB(A) en journée et à une valeur de 60 dB(A) la nuit.

Il y a quatre conclusions importantes pour les caractéristiques physiologiques du confort visuel des piétons :

- à l'exception de rues très étroites et profondes ou de certaines arcades, la lumière naturelle est toujours suffisante dans les espaces urbains du point de vue du confort visuel.
- il faut favoriser les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. En première approximation, ces zones correspondent aux parties de l'espace pour lesquelles le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de l'espace reste inférieur à 1/2 (c'est-à-dire $H/W < 0.5$).
- pour correspondre aux préférences des utilisateurs de ces espaces, le potentiel d'enseillement direct d'un espace public devrait couvrir entre 20% et 80% de sa surface totale quelle que soit l'heure ou la saison.
- Les problèmes majeurs rencontrés à l'extérieur du point de vue quantitatif du confort visuel sont de deux types :
 - en journée, les risques d'éblouissement qui sont le plus souvent générés par les réflexions spéculaires du rayonnement solaire direct sur des surfaces très réfléchissantes.
 - après le coucher du soleil, le mauvais éclairage artificiel des espaces publics.

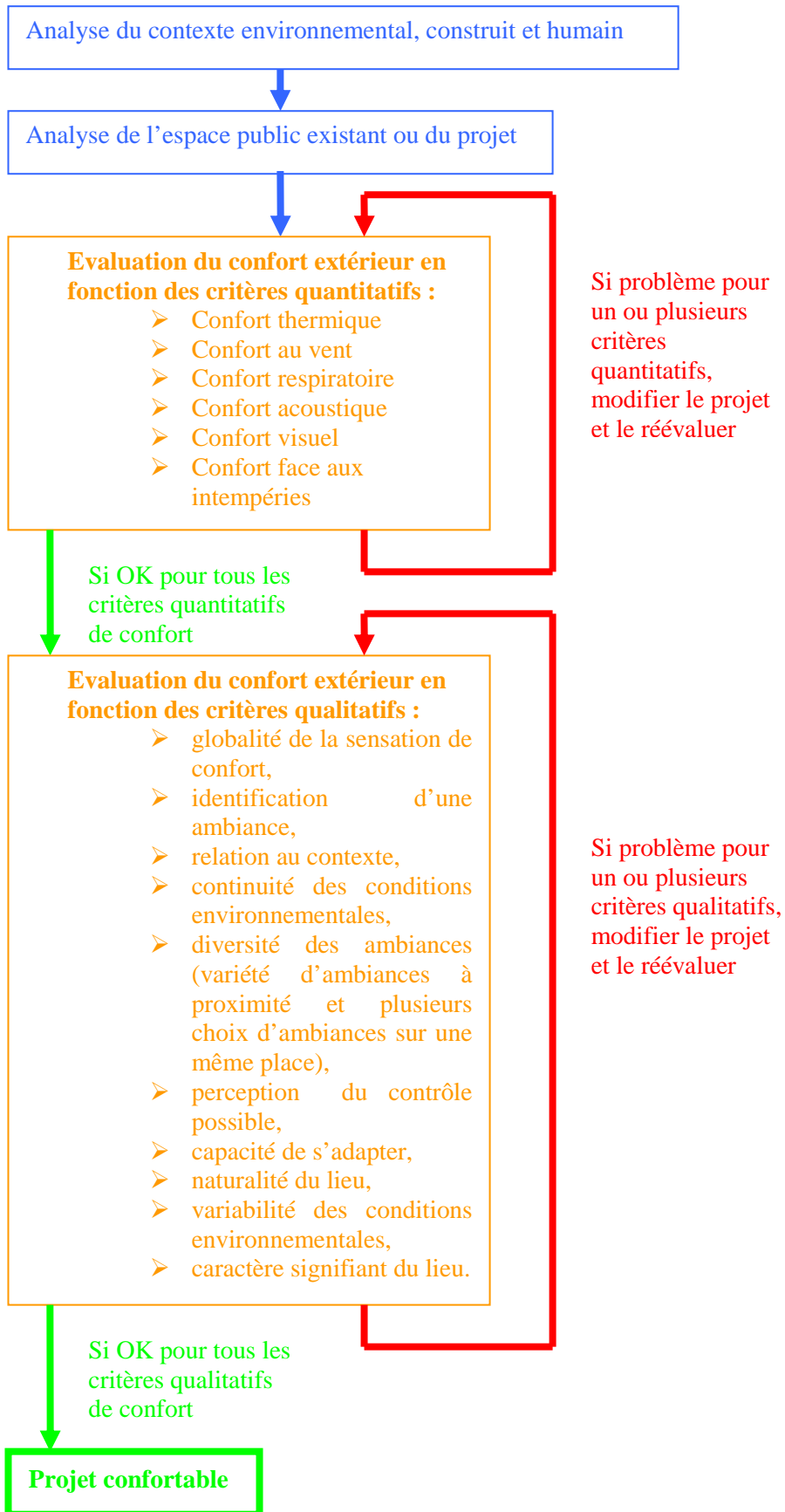
Un élément important du confort physiologique constitue le fait de pouvoir être à l'abri des intempéries (pluie, neige,...). Dans les pays à fortes précipitations, toutes les protections contre les intempéries sont à valoriser : auvents, galeries,...

Différents critères psychologiques du confort humain à l'extérieur ont pu être mis à jour dans cette étude. Nous devons être conscients des implications significatives de ces éléments psychologiques sur le confort extérieur. Les concepteurs de l'espace urbain devraient tenir compte de ces paramètres pour améliorer la qualité de nos villes. Nous avons relevé dix paramètres qui influencent de manière significative l'évaluation qualitative du confort à l'extérieur. Il s'agit de:

- la globalité de la sensation de confort,
- l'identification d'une ambiance,
- la relation au contexte,
- la continuité des conditions environnementales,
- la diversité des ambiances (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
- la perception du contrôle possible,
- la capacité de s'adapter,
- la naturalité du lieu (qui est aussi marquée par le besoin de stimulations environnementales en milieu urbain),
- la variabilité des conditions environnementales,
- le caractère signifiant du lieu.

Nous conseillons d'évaluer dans un premier temps une situation quantitativement suivant les moments les plus importants de l'année et de la journée pour pouvoir établir des % de temps représentant telle ou telle situation. A partir de ces données, il est possible d'évaluer les critères qualitatifs décrits. Ces situations devraient alors être évaluées séparément et dans leur globalité pour voir quels sont les éléments environnementaux utiles à modifier pour que la plupart du temps, en fonction des activités les plus fréquentes prévues, le confort global (quantitatif et qualitatif) des personnes soit assuré.

Le graphe ci-dessous synthétise la nouvelle méthode d'évaluation du confort extérieur qui a été développée dans le cadre de ce doctorat.



Malgré la complexité des interrelations ci-dessus, il est possible de considérer quelques pistes de conception qui vont influencer le confort des piétons en site urbain. Ainsi, il est déjà possible de modifier les conditions de confort d'une place par plusieurs moyens:

- en modifiant le microclimat d'un lieu par l'adaptation d'un de ses paramètres physiques, en général le rayonnement solaire ou le vent.
- en contrôlant le niveau sonore d'un espace.
- en valorisant les spécificités d'un lieu.
- en assurant la cohérence entre les différents types de stimulations environnementales (ex : ambiance sonore et vision).
- en tenant compte du type de public habituel.
- en suscitant des activités adaptées au lieu.
- en créant des lieux de transition entre zones différentes (intérieur/extérieur, etc.) pour atténuer les contrastes par rapport à l'expérience passée récente et améliorer la continuité des conditions climatiques et sonores.
- en créant une ambiance différente de celle des places situées à proximité.
- en proposant plusieurs possibilités d'ambiances dans un même lieu: de l'ombre et du soleil, du vent et un abri, de l'animation et du calme,
- en augmentant le contrôle perçu (par exemple par des parasols mobiles, ...).
- en augmentant la naturalité du lieu.
- en jouant sur la qualité signifiante des éléments d'aménagement du lieu.
- en assurant un équilibre global entre ses différents critères de confort.

La comparaison des critères de confort à l'extérieur avec la définition des concepts fondateurs d'un lieu public définis dans la première partie de cette thèse montre qu'il y a des **similitudes évidentes entre les critères qualitatifs du confort à l'extérieur et les qualités de conception globales des places publiques durables**. Nous pouvons ainsi créer un tableau de correspondances :

Stratégie	Lieu public	Environnement confortable
Contextualité	Intégration	Relation au contexte et continuité des conditions environnementales.
	Participation	Perception du contrôle environnemental possible
	Adaptation	Capacité de s'adapter
Coexistence	Rassemblement	Plusieurs choix d'ambiances microclimatiques sur une même place
	Diversité	Diversité des ambiances situées à proximité
	Ouverture à l'altérité	Variabilité des conditions environnementales
Cohérence	Identité	Identification d'une ambiance et globalité de la sensation de confort
	Sens	Caractère signifiant du lieu
	Naturalité	Naturalité du lieu

Ces similitudes soulignent le fait que la question du confort dans les espaces publics extérieurs est une question autant architecturale que technique. On peut donc y répondre par une méthode de conception adaptée. Pour concevoir des espaces publics confortables, le concepteur doit intégrer les contraintes liées au confort des piétons dans une conception globale de qualité, équilibrant de manière harmonieuse les principes de contextualité, de coexistence et de cohérence.

D'autre part, la découverte de ces similitudes nous permet d'affirmer que **notre stratégie de développement durable des espaces publics est aussi un outil qui favorise le confort des piétons en ville**. Ainsi, cette stratégie de conception et de rénovation durable des espaces publics nous permet d'appréhender ensemble l'être et son environnement, le local et le global, le point de vue humain et la multi-dimensionnalité de notre milieu, c'est-à-dire la véritable complexité des conditions du comportement humain.

Le microclimat d'un lieu est une clé de conception pour des ambiances architecturales et urbaines de qualité. Son utilisation judicieuse est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, énergétiques et environnementales de nos villes. Cependant, bien que la conception d'un bâtiment du point de vue bioclimatique a été largement analysée, l'influence de la forme urbaine sur le microclimat extérieur est en général négligée. De plus, un de ses paramètres fondamentaux, le vent, est encore très peu étudié. Il y a donc actuellement un manque crucial d'informations et d'outils faciles et rapides permettant aux concepteurs de projets urbains d'intégrer la préoccupation microclimatique.

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat changer au rythme de l'activité humaine. Les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui modifient le microclimat urbain. Des éléments urbanistiques tels que la minéralisation généralisée des sols ou la présence de bâtiments élevés ont également un impact fondamental sur les modifications des différents paramètres climatiques en ville. En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesses de vent plus faibles mais turbulences plus élevées, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air,...

Le microclimat réel sur un site peut être significativement différent de celui mesuré à la station météorologique, surtout si le projet est situé en milieu urbain. Si, à l'heure actuelle, les seules données climatiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site dégagé, comment tenir compte de l'effet de l'urbanisation dans notre conception architecturale et urbaine? Comment prédire et simuler ces effets? Dans cette thèse de doctorat, nous avons analysé les caractéristiques microclimatiques et les spécificités du microclimat urbain (la pollution de l'air, l'effet d'îlot de chaleur, la modification du rayonnement solaire, la modification des mouvements d'air et la modification de l'humidité et des précipitations). Les paramètres climatiques (température, rayonnement solaire et terrestre, vent, précipitations et humidité) sont modifiés par la topographie, la nature du sol et l'aménagement d'un site (présence et orientation d'obstacles construits et végétaux). En milieu urbain, les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des hauteurs des édifices, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Cette partie décrit également les méthodes d'évaluation des paramètres microclimatiques en milieu urbain, pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à intégrer les paramètres microclimatiques dans le processus de conception de leurs projets. **Le microclimat urbain suit une logique propre qui devrait enrichir tout projet urbain.**

Sous un climat tempéré, ce qui est le cas de la Belgique, les deux éléments climatiques essentiels pour le confort des piétons à l'extérieur sont le rayonnement solaire et le vent. Le rayonnement solaire est déjà largement étudié dans la littérature scientifique ; nous nous sommes contentés d'en synthétiser les éléments

importants du point de vue de la conception architecturale et urbanistique. Par contre, cette recherche a mis en évidence un manque réel d'études scientifiques et d'outils d'aide simplifiés pour comprendre l'écoulement du vent en milieu urbain, malgré son importance significative sur le confort des personnes et les consommations énergétiques des bâtiments. C'est pourquoi une partie importante de ce doctorat a été dédiée à l'analyse des outils de simulation du vent et à l'élaboration d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des constructions.

Nous avons comparé les différents outils de simulation du vent et nous avons choisi de travailler avec les simulations numériques en mécanique des fluides (CFD) et plus particulièrement avec le logiciel FLUENT. Les avantages des simulations CFD par rapport aux résultats de tests en tunnel à vent sont:

- la relative rapidité des simulations numériques par rapports à des essais en soufflerie aérodynamique,
- le traitement des résultats sur l'ensemble du domaine simulé.
- la clarté de la visualisation des mouvements d'air qui en font un outil de compréhension et de présentation des résultats remarquable.
- la CFD est un outil de pointe récent mais qui s'améliore d'année en année.
- contrairement aux tests en tunnel à vent, les simulations CFD ne nécessitent aucune réduction d'échelle, ce qui élimine donc certaines erreurs dues à la réduction des géométries complexes ou aux facteurs d'échelle employés.

L'écoulement du vent autour d' « objets non profilés » est un phénomène très complexe à simuler. Une validation scientifique de l'outil de simulation choisi était donc nécessaire. La **validation de FLUENT** comme outil d'étude du vent en milieu urbain a été réalisée en comparant mes résultats de simulations avec des tests en tunnel à vent. Cette validation s'est faite en trois étapes : l'analyse de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé, l'analyse de l'écoulement du vent autour de groupes de deux bâtiments et enfin l'analyse de l'écoulement du vent en milieu urbain dense. Cette validation montre que la distribution du vent autour des bâtiments peut être simulée numériquement avec un très haut degré de précision.

Les simulations réalisées pour la validation de FLUENT nous ont permis de déterminer des **règles pour l'élaboration des simulations numériques** et le choix des différents paramètres dans le cadre d'études du vent autour des bâtiments: la taille du domaine de simulation, la précision du maillage, le modèle de turbulence, l'ordre de précision du calcul, les conditions aux limites et le profil de vent utilisé. Toutes nos simulations d'environnements urbains ont ensuite été réalisées selon ces règles, en utilisant le modèle de turbulence RSM (Reynolds-stress model) de FLUENT convergé au second ordre. Des maillages de grande taille (un million à deux millions de cellules) ont été élaborés avec un raffinement important autour des bâtiments simulés (mailles de 0.5m de haut au niveau des façades au vent et des zones critiques de l'écoulement qui l'entourent). Toutes nos simulations ont été réalisées avec un profil de vent urbain. Cette validation et ces règles d'élaboration de simulations numériques sont une base importante pour des recherches scientifiques ultérieures dans le domaine de l'interaction entre le vent et les bâtiments.

En suivant ces règles d'élaboration d'une simulation CFD, l'erreur maximale atteinte entre nos simulations et des tests en tunnel à vent pour l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé ou d'un groupe de deux bâtiments est inférieure à 15% sur l'ensemble de la zone où les vitesses de vent sont inconfortables pour les

piétons et elle n'est que de quelques pourcents (<5%) pour la pointe maximale des survitesses. De plus, la position de la survitesse maximale est très bien simulée.

Vu la complexité de l'écoulement du vent en milieu urbain dense, les méthodes CFD ne donnent pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point dans un tel contexte construit. Il faut signaler que des erreurs de l'ordre de 40% ou même plus peuvent se produire très localement. En revanche, en suivant les règles que nous avons élaborées pour la construction d'une simulation dans un milieu urbain dense (maillage de 0.5m de haut et 2m x 2m de large sur l'ensemble de la zone simulée), nous obtenons des résultats moyens de qualité. Pour les rues exposées au vent dans un tissu de hauteur homogène, l'erreur relative est inférieure à 15% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent sur l'ensemble de la rue. Pour les sections de rues abritées du vent dans un tissu de hauteur homogène, l'erreur relative est inférieure à 20% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent sur l'ensemble de ces sections de rues protégées. Cette erreur est légèrement plus élevée que les autres limites acquises jusqu'à présent mais il est important de se souvenir qu'elle concerne des vitesses de vent très faibles où le confort des personnes n'est pas mis en cause.

A l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé, l'erreur relative est inférieure à 20% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent, pour les différentes zones d'écoulement, y compris dans la zone de sillage du bâtiment élevé. Cette limite peut être abaissée à 10% en utilisant des mailles mesurant horizontalement 1.5m x 1.5m sur l'ensemble de la zone à quantifier. La pointe maximale des survitesses générées au pied d'un bâtiment élevé situé au sein d'un milieu urbain dense de petite hauteur est simulée avec une précision de 15%. Les zones de survitesses importantes en milieu urbain dense sont bien localisées mais les pointes de survitesses peuvent être décentrées localement.

Il est donc important de considérer les simulations CFD de milieux urbains denses comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé à l'intérieur du milieu urbain. Des résultats encore plus précis peuvent toutefois être obtenus si les maillages sont fortement densifiés, ce qui n'était pas possible dans cette thèse en fonction des moyens de calcul dont nous disposions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux résultats obtenus sur l'ensemble du domaine simulé. En outre, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour des bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour d'un bâtiment isolé, autour d'un petit groupe de bâtiments, en milieu urbain dense de hauteur homogène et

relativement faible ainsi qu'en milieu urbain dense de hauteur faible comprenant un bâtiment élevé.

Nos simulations numériques de l'écoulement du vent autour des bâtiments, nous ont permis d'élaborer des outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation des vitesses du vent autour de bâtiments de formes simples. Il est important de souligner que nous avons fait le choix de baser nos simulations et nos outils quantitatifs sur une analyse du projet en fonction des mécanismes d'écoulement du vent plutôt qu'une analyse basée uniquement sur la forme des bâtiments. Ce choix permet en effet de diminuer le nombre de simulations à réaliser et en même temps de faciliter la compréhension des phénomènes aérodynamiques. Pour chaque type d'effet du vent autour des bâtiments, des outils quantitatifs et des conseils pratiques de conception sont donnés par rapport au problème considéré.

Les outils d'évaluation des survitesses de vent autour des bâtiments que nous avons élaborés à l'aide de nos simulations FLUENT permettent de quantifier et de comprendre les effets suivants :

- tous les mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples :
 - l'effet de coin,
 - l'effet de cisaillement,
 - l'effet de passage sous immeuble,
 - le rouleau tourbillonnaire,
 - l'effet de barre.
- l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé.
- trois mécanismes critiques du vent autour de groupes de bâtiments :
 - l'effet Venturi,
 - l'effet Wise,
 - l'effet de double coin.
- trois types d'écoulement du vent dans un milieu urbain dense :
 - l'effet de masque urbain,
 - l'effet canyon
 - l'implantation d'un bâtiment élevé dans un milieu urbain de faible hauteur.

Les autres mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de groupes de bâtiments (effet de bâtiments en quinconce, effet de canalisation, effet de maille, effet d'écran linéaire et effet de pyramide), l'effet de la végétation et les autres mécanismes spécifiques de l'écoulement du vent en milieu urbain dense (ensembles de bâtiments élevés) sont expliqués et quantifiés à partir de résultats trouvés dans la littérature.

La méthodologie développée dans cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent, y compris au sein d'un milieu urbain complexe, ou pour réaliser des études spécifiques d'un contexte particulier à l'aide de simulations CFD.

Dans cette thèse, nous avons ensuite étudié la qualité sonore de l'environnement urbain et l'effet de ce domaine sur une conception du paysage urbain de qualité. Nous désirons entre autres attirer l'attention des concepteurs et des décideurs sur le fait que la conception d'espaces publics confortables pour les piétons du point de vue acoustique nécessite une étude plus complexe que la seule évaluation du

niveau sonore en dB(A) : la qualité sonore d'une ambiance n'est pas équivalente au niveau de bruit mesuré dans ce lieu. La méthodologie que nous proposons est la combinaison intelligente de cartes de bruit avec une approche perceptuelle de la qualité acoustique d'une ambiance urbaine: les promenades sonores. Cette méthode permet de travailler sur l'acoustique urbaine à l'échelle des rues, des places, des parcs,...

Finalement, cette thèse de doctorat propose des règles de conception pour l'intégration des différents paramètres microclimatiques et acoustiques dans les projets urbains. Cette stratégie des ambiances urbaines est développée en un ensemble de principes d'intervention formant un canevas pour les actions futures aux deux niveaux d'action de la conception urbanistique : la planification urbaine et la morphologie urbaine.

Au niveau de la planification urbaine, les quatre éléments de composition essentiels à cette échelle sont l'implantation du projet, la densité construite, les moyens de transport utilisés et la répartition des zones d'espaces verts.

Lors de la création d'un nouvel ensemble urbain, il y a lieu de choisir le terrain idéal d'un point de vue microclimatique. Les industries polluantes seront placées sous le vent de la ville par rapport aux vents dominants, ainsi que toutes les infrastructures bruyantes telles que les aéroports,... La densité idéale est celle de la ville compacte car c'est la configuration urbaine la plus favorable aux gains d'énergie. Il est également important de prévoir des transports en commun efficaces ainsi que d'offrir une abondance d'espaces publics de rencontre et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo.

C'est au niveau de la morphologie urbaine, que les enjeux microclimatiques sont les plus importants. Les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des tailles et des hauteurs des coupes, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Le choix des types de matériaux de surface et la présence d'eau sont également des éléments à analyser.

Les objectifs de conception de la morphologie urbaine pour le confort des piétons sont de :

- limiter les sources de pollution (air, eau, sol, bruit).
 - Limiter la circulation automobile
 - ...
- Générer un environnement confortable du point de vue physiologique par l'évaluation des différents paramètres physiques et leur adaptation éventuelle si nécessaire. Par exemple :
 - Créer des places et des promenades exposées au soleil en hiver mais partiellement ombragées en été,
 - Protéger les espaces publics des vents froids et dominants,
 - Eviter de concevoir des bâtiments élevés,
 - Assurer la ventilation des espaces publics,
 - ...
- Favoriser l'adaptation psychologique des piétons.

Pour limiter les consommations d'énergie d'un bâtiment, la réflexion énergétique, envisagée dès le choix du lieu d'implantation, s'attachera à réduire toutes les sources de consommation. Citons quelques stratégies importantes :

- diminuer l'énergie liée aux transports effectués par les utilisateurs du bâtiment.

- diminuer l'énergie liée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage du bâtiment. La conception des bâtiments et des espaces publics doit
 - maximiser les gains solaires en hiver.
 - minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe.
 - offrir la possibilité de refroidir le bâtiment grâce à la ventilation naturelle.
 - offrir la potentialité d'un éclairage naturel du bâtiment conçu et des bâtiments environnants.
- valoriser les ressources locales.
- favoriser les énergies renouvelables.

Pour limiter l'empreinte écologique de nos urbanisations, il faut en plus :

- réduire l'utilisation d'énergie due aux transports en augmentant la densité construite, en améliorant la distribution des transports en commun et en assurant des cheminements confortables pour les piétons et les cyclistes.
- favoriser l'utilisation de l'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable.

Voici quelques règles simples pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics en fonction de l'ensoleillement:

- les bâtiments les plus élevés sont placés du côté nord du site, pour tenir compte de l'effet d'ombrage.
- des hauteurs plus faibles sont conservées du côté sud.
- la création des places présente une orientation préférentielle vers le sud.
- l'ensoleillement est favorisé sur les places en hiver mais un ombrage est au moins partiellement accessible en été (20 à 80% de la surface totale). L'utilisation d'arbres à feuilles caduques est un moyen privilégié pour le confort des piétons.
- il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments.

Dans les climats froids et tempérés, les espaces ouverts devraient généralement être :

- assez larges pour permettre un accès au soleil dans les espaces publics,
- orienter les bâtiments pour qu'ils puissent profiter au maximum des gains solaires en hiver. Ainsi, une orientation E-O des rues est toujours idéale.

En général en Belgique, il est souhaitable que les angles d'obstruction des bâtiments ne dépassent pas 25° pour l'angle vertical sur une section angulaire allant du SE au SO. Mais il serait idéal d'avoir au moins une distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments ; cet angle vaut 15.8° à Uccle. De plus, vu qu'en Belgique le ciel est souvent couvert, il est judicieux de choisir des surfaces de sol qui soient plutôt claires pour augmenter les réflexions lumineuses. De même au niveau des façades, les surfaces exposées au sud, devraient présenter des coefficients de réflexion plus élevés pour renvoyer la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face. Il faut toutefois éviter les surfaces très réfléchissantes (miroir,...) au sud car elles peuvent causer de l'éblouissement.

Essayer de créer des microclimats urbains proches de la zone de confort pour les piétons permet de limiter fortement les dépenses énergétiques des bâtiments car ce sont aussi les températures qui demandent le moins d'énergie pour chauffer ou refroidir l'intérieur des bâtiments.

Les éléments suivants aident à limiter fortement les pertes de chaleur en période de chauffe, ce qui est un critère de conception essentiel en climat tempéré :

- la densité du bâti et la concentration des activités. L'îlot de chaleur est bénéfique pour notre climat au niveau des consommations d'énergie des bâtiments : si la température extérieure est plus chaude, la différence de température int/ext est plus faible, en période de chauffe, ce qui réduit les pertes de chaleur à la fois par conduction et ventilation/infiltration.
- la protection par rapport aux vents dominants, grâce à l'effet de masque urbain, à une meilleure étanchéité des bâtiments, à la réduction des surfaces exposées au vent ou à l'installation d'écrans extérieurs (bâtiments ou murs de grande longueur, végétation, brise-vents, etc).
- l'utilisation de la compacité du bâti, c'est-à-dire réduire le rapport entre surfaces et volumes pour créer des bâtiments compacts. Des maisons individuelles consomment jusqu'au double d'énergie au m² que des appartements dans un immeuble multifamilial.
- éviter les sites situés au sommet des collines ou au fond des vallées ; la zone intermédiaire est la plus bénéfique.

Pour conserver un minimum d'effet d'îlot de chaleur urbain et donc limiter les consommations de chauffage des bâtiments tout en élargissant la période de confort dans les espaces publics urbains en Belgique, nous devrions concevoir une morphologie urbaine dont le rapport H/W ne descend pas en-dessous de 0.4. Une manière d'augmenter la densité construite et l'efficacité énergétique simultanément consiste à augmenter la compacité du tissu urbain tout en conservant une profondeur de bâtiments faible (de l'ordre de 10 à 12m), avec une orientation solaire appropriée des façades.

Au niveau thermique, on peut aussi profiter de l'ensoleillement en plaçant des matériaux à forte inertie thermique au sud, créer des espaces de transition ou réguler la température grâce à des surfaces d'eau et à la végétation.

Par rapport au vent, il est nécessaire :

- de protéger les places des vents froids et dominants
- d'éviter que les bâtiments ou le paysage ne génère des turbulences inacceptables pour le confort des piétons. Les bâtiments très élevés sont à proscrire des centres urbains.
- de favoriser les possibilités de ventiler l'espace pour évacuer la pollution et rafraîchir l'ambiance en été. On peut par exemple profiter de la topographie et de la végétation pour guider les vents et permettre une ventilation naturelle des espaces publics.

Pour le confort des piétons, les tissus denses de hauteur homogène relativement faible, tels que les centres des villes traditionnelles, assurent globalement un excellent confort au vent. En effet, lorsque les bâtiments d'une ville sont approximativement de la même hauteur, il y a une séparation entre le flux d'air au-dessus des bâtiments et l'air qui circule dans les rues. Les quelques accidents aérodynamiques à craindre se situent alors à la périphérie et dans les zones très dégagées. Cependant, les villes contemporaines présentent des constructions très élevées qui entraînent des rafales de vent inacceptables au niveau piéton. Il est indispensable d'étudier l'impact du vent au niveau du sol pour des bâtiments dont la hauteur est supérieure ou égale à 40m mais il est prudent d'étudier cet aspect dès

qu'un bâtiment de 15 à 40m de haut présente une hauteur au moins égale au double de la hauteur moyenne de son environnement bâti.

Lorsqu'un projet présente des risques d'inconfort au niveau piéton à cause du vent, il faut évaluer le projet en fonction des différents mécanismes critiques d'écoulement du vent (l'effet de coin, l'effet de sillage, l'effet de trous sous immeuble, le rouleau tourbillonnaire, l'effet de barre, l'effet Venturi, l'effet Wise, l'effet de double coin, l'effet de bâtiments en quinconce, l'effet de canalisation linéaire). En milieu urbain, ces effets apparaissent à la base des bâtiments dont la hauteur est nettement plus élevée que le plan masse moyen et au pied des ensembles de tours.

Voici quelques règles de bonne pratique qui permettent d'atténuer le problème, lorsqu'un de ces écoulements critiques apparaît dans le projet:

- réduire la hauteur du bâtiment,
- éviter les larges façades faisant face au vent dominant, orienter de préférence l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents les plus fréquents,
- ceinturer les bâtiments élevés par des constructions plus basses,
- densifier l'environnement,
- prévoir des éléments poreux (végétation,...) près des coins ou des passages sous le bâtiment,
- augmenter la rugosité des façades par des balcons (>6m de large).
- ...

Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Pour les bâtiments très élevés, la meilleure forme pour la protection au vent est toujours celle qui minimise sa hauteur.

Il faut toutefois faire attention qu'un excès de protection au vent peut rendre l'air des villes irrespirable. Dans tous les climats, les espaces publics qui subissent des sources de pollution locales (trafic,...) doivent être assez larges pour permettre au vent de disperser la pollution. Il faut également dimensionner des hauteurs de cheminées suffisamment hautes pour empêcher que le vent ne redirige la pollution générée en toiture vers le sol. Une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.7$ associé avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30 à 45° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

L'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain ($H \geq 1.5$ h). Des différences de hauteurs raisonnables peuvent à la fois favoriser la dispersion des polluants tout en conservant le confort des piétons du point de vue de l'effort mécanique du vent. Enfin, l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

En Belgique, si on compare les formes de tissus urbains en fonction de différents critères de limitation des consommations d'énergie et de maximisation du confort, on trouve que le rapport H/W idéal vaut 0.4 à 0.5 et que la densité construite idéale varie entre 0.2 et 0.25.

Pour la Belgique, le critère de l'accès au soleil est l'élément le plus critique à prendre en compte lors de la conception de nouveaux quartiers. En Europe, les

centres-villes présentent toutefois des rapports H/W de 0.75 à 1.7 en moyenne, ce qui est nettement plus élevé que ce que nous recommandons. Les centres-villes d'Amérique du Nord, avec leurs gratte-ciels, atteignent une moyenne de 1.15 à 3.3, ce qui est encore bien pire. Du point de vue de la densité construite, les villes européennes sont également plus denses que les villes nord-américaines à cause de leurs immenses suburbs. Les valeurs que nous avons déterminées devraient toutefois permettre d'encore améliorer la morphologie urbaine de nos villes à travers la conception des nouveaux quartiers et la rénovation des quartiers existants.

Dans les pays fortement pluvieux, il est nécessaire d'offrir des espaces et des parcours extérieurs couverts. Pour se protéger de la pluie, les arcades et les galeries couvertes sont des éléments essentiels pour une conception microclimatique de qualité. Ainsi, en Belgique, les auvents et galeries sont toujours bienvenues pour nous protéger des intempéries.

Il est indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit. La première action à poser est donc de permettre aux eaux de pluies de s'infiltrer dans le sol, le plus rapidement possible pour qu'elles restent propres, afin de continuer à alimenter les nappes phréatiques. Une végétation adaptée retient les eaux de pluies et réduit considérablement le ruissellement. Des revêtements filtrants, des fossés, des puits ou des bassins filtrants permettent également d'éviter le ruissellement en surface. Ensuite, pour les eaux de ruissellement inévitables, il faut tenter de ralentir leur écoulement vers l'aval afin d'éviter les inondations. Le but est de supprimer les canalisations d'eaux pluviales enterrées. Les zones de rétention, bassins d'orages végétalisés, étangs ou canaux aménagés au sein même des quartiers recueillent les eaux de pluie et recréent ainsi des biotopes. Ainsi, la promotion de la perméabilité des surfaces dans les zones urbaines et la séparation du ruissellement des eaux de pluies du système d'égouts pourraient contribuer à la recharge des nappes d'eau souterraines, à l'abaissement du coût de la collecte et de l'épuration des eaux usées et à la réduction des inondations urbaines.

Pour assurer une bonne qualité d'ambiance sonore en ville, il est nécessaire :

- d'opérer un travail de limitation des sources de bruit,
- de limiter la propagation du bruit en milieu urbain,
- de valoriser les qualités sonores du lieu.

Améliorer le confort acoustique en ville peut être mis en œuvre grâce à différents moyens :

- diminuer l'intensité du trafic (rues piétonnes, limitation des parkings en ville, sensibilisation de la population, canalisation du trafic de transit sur quelques grands axes,...),
- diminuer la vitesse des véhicules (aménagement locaux de voiries, zones 30, etc),
- choisir un revêtement de sol peu bruyant,
- augmenter la distance entre la source de bruit et les zones de détente,
- utiliser la continuité du bâti comme barrière acoustique,
- entourer un espace de détente par un ensemble de bâtiments,
- utiliser des éléments sonores agréables (ex : fontaines) comme masques sonores.
- créer des différences de niveaux entre la source de bruit et les espaces de détente.

- ajouter des espaces tampons entre des ambiances acoustiques trop contrastées.
- utiliser des matériaux absorbants.

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit. Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

Il est également important de prendre en compte le choix des matériaux de construction pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les implications énergétiques et visuelles de l'éclairage artificiel des espaces publics urbains. Enfin, l'utilisation des sources d'énergie renouvelable permet de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluante. Les énergies renouvelables sont d'autant plus crédibles et rentables que les besoins énergétiques sont faibles.

Ainsi, grâce à la réalisation d'outils d'aide méthodologiques et techniques, ce doctorat comble le profond écart entre la pratique de la conception architecturale et les technologies actuelles de simulations du microclimat urbain, trop spécifiques et complexes pour les architectes et les urbanistes. Dès lors, les résultats et les outils d'aide produits par ce doctorat permettent enfin à la « contrainte » microclimatique de devenir un support de la création architecturale.

Cependant, pour que l'habitat microclimatique soit compatible avec des formes urbaines riches et complexes, le concepteur doit intégrer ces contraintes climatiques dans une conception d'ensemble. Ainsi, il est important de ne pas seulement imposer des critères géométriques et quantitatifs. Les bonnes solutions architecturales sont toujours un compromis entre les multiples exigences interdisciplinaires qui s'y rejoignent, dont le microclimat est un des facteurs permettant de poser des choix de définition de notre cadre bâti.

Prospectives...

Cette thèse de doctorat ouvre un champ de recherches très vaste. Citons quelques thèmes qui mériteraient d'être abordés dans les prochaines années...

Il serait intéressant de prolonger notre réflexion sur les principes de cohérence, de coexistence et de contextualité du milieu urbain. Une question essentielle est celle de l'échelle d'application idéale des différentes qualités urbaines mises en évidence, telles que le rapport entre ordre et désordre, la mixité sociale et fonctionnelle, les opportunités d'appropriation, ... Chaque caractéristique a-t-elle une échelle d'application privilégiée : le bâtiment, la rue ou la place, l'îlot urbain, le quartier ou la ville... ou bien peuvent-elles se décliner de manière variée à ces différentes échelles ? Il serait utile d'analyser et de comparer les différentes manières d'appliquer chacune de ces caractéristiques fondatrices de la soutenabilité des espaces publics aux différentes échelles du milieu urbain.

La majorité des modèles de simulations énergétiques des bâtiments adopte habituellement la perspective d'un bâtiment isolé (paramètres architecturaux et systèmes installés), en négligeant l'interdépendance entre le bâtiment et son contexte construit. Ainsi, l'effet de la géométrie urbaine sur les consommations énergétiques des bâtiments reste un sujet encore très peu étudié. L'influence de l'ombrage créé par les bâtiments voisins n'est prise en compte que par un logiciel énergétique sur trois. Des éléments aussi complexes que l'écoulement du vent en milieu urbain dense ou l'évaluation de l'effet d'îlot de chaleur ne sont jamais pris en compte.

Un domaine de recherche qui a reçu relativement peu d'attention ces dernières années est l'étude de comment minimiser les problèmes de la pollution atmosphérique urbaine à l'échelle locale. On pourrait par exemple étudier l'impact de l'emplacement et de la distribution des rues polluantes dans le tissu urbain ou approfondir l'étude du type de morphologie construite qui facilite la dispersion des polluants par le vent au niveau des espaces publics piétons et des façades des bâtiments.

Enfin, différents sujets interdisciplinaires ayant trait au développement durable des villes nécessitent des études plus poussées. Citons notamment l'influence de l'urbanisation sur la biodiversité, l'impact du renouvellement des espaces publics urbains sur la qualité des échanges interpersonnels dans les quartiers rénovés, les bénéfices économiques qu'on peut tirer d'une densité urbaine durable,...

Le mot de la fin...

Les outils développés dans cette thèse pour les architectes, les urbanistes et les décideurs politiques comprennent:

- une stratégie pour prendre en compte la problématique du développement durable des espaces publics urbains contemporains existants ou en phase de conception.
- une nouvelle méthodologie pour l'étude du confort des piétons à l'extérieur, basée sur des critères quantitatifs et qualitatifs.
- des règles de conception et différents modèles simplifiés pour prédire le confort physiologique des piétons (confort thermique, confort au vent, confort respiratoire, confort visuel et confort acoustique) en utilisant les données météorologiques disponibles et les caractéristiques de la morphologie urbaine.

Cette recherche devrait aider en pratique les architectes et les urbanistes à concevoir et évaluer les ambiances générées par leurs projets urbains dans le cadre du développement durable des villes. L'urbaniste et l'architecte disposent désormais des outils d'identification dans le tracé de leurs plans masses des zones susceptibles d'être critiques ou clémentes en fonction du microclimat et de l'acoustique. Ainsi, cette thèse de doctorat enrichit de manière évidente la connaissance des ambiances urbaines, tout en proposant des méthodes et des solutions applicables concrètement.

Cette approche devrait donc assister la conception des villes à travers la conception d'espaces ouverts de qualité, contribuant au développement durable des villes du futur. La diffusion de cette thèse devrait apporter de nombreux bénéfices environnementaux, sociaux et économiques à notre société grâce à un meilleur développement de nos urbanisations contemporaines. Citons notamment :

- la revalorisation de l'étude des espaces publics et du microclimat urbain.

- la mise en évidence de l'importance du point de vue humain et de son expérience corporelle dans tout projet urbain.
- l'information offerte aux décideurs politiques pour les aider dans la sélection des projets urbains.
- la formation des concepteurs de projet et donc la réalisation de meilleurs projets architecturaux et urbanistiques.
- la sensibilisation de la population aux problèmes de notre environnement bâti, ce qui devrait augmenter la responsabilité citoyenne.
- de nombreux impacts positifs dus à une conception microclimatique de nos espaces publics :
 - l'amélioration de la qualité de vie dans les espaces publics collectifs en ville (équité sociale, bien-être, ...),
 - l'accroissement de l'utilisation des places urbaines (mixité de la population, rencontres, visibilité sociale, démocratie, ...),
 - la diminution des consommations d'énergie des bâtiments (gains solaires, ventilation,...) et des espaces publics (diminution de la circulation automobile, valorisation des moyens de transport écologiques et communautaires,...).
 - des effets bénéfiques pour la planète (valorisation de l'image des villes, retour des habitants dans les centres de nos villes, diminution de l'étalement urbain,...),
 - la limitation de nuisances environnementales (diminution de la pollution, amélioration de la santé des habitants, ...).

Cependant, aucune méthode, aucun principe, aucune technique ne peut se substituer à l'intention architecturale, à l'écriture qui relie un espace à sa fonction tout en la transcendant. Là, est la nécessité de l'architecture, là est la responsabilité du concepteur, qui demeure le créateur d'un espace. Si l'étude des ambiances urbaines se base sur des données scientifiques, sa mise en application relève de la sensibilité et de la capacité de composition de l'auteur de projet.

Les outils développés dans cette thèse comprennent également une partie destinée aux chercheurs scientifiques:

- une validation du logiciel Fluent (CFD) pour l'étude de la vitesse moyenne du vent en milieu urbain.
- des règles pour l'élaboration de simulations CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments. Ces règles comprennent le choix du type de maillage, le modèle de turbulence, la grandeur du domaine simulé, la taille des mailles, les paramètres de calcul et les conditions aux limites les plus judicieux dans l'écoulement du vent en milieu urbain.

Au-delà des travaux présentés ici, cette thèse permet de souligner l'intérêt colossal d'une démarche qui consiste à confronter les résultats issus de disciplines très variées et à tisser des liens entre différentes tentatives de compréhension de l'univers. Le développement durable de l'humanité nécessite une vision holistique et une grande interdisciplinarité. Il est donc important d'essayer de comprendre les lois qui nous gouvernent par une approche plus globale que celle à laquelle la recherche scientifique nous a habitués, de manière à mieux saisir la complexité du monde et les multiples interactions qui relient l'homme à l'univers, pour favoriser l'évolution de l'humanité sur Terre.

Dans ce doctorat, nous avons élargi le point de vue habituellement technologique et a-contextuel porté sur les phénomènes de confort extérieur et de microclimat urbain par la prise en compte du contexte global de l'urbanisation actuelle et de la

complexité de l'expérience humaine dans ses aspects psychologiques autant que physiologiques. Ainsi, ce doctorat devrait aider les concepteurs de projets urbains à tenir compte de la multi-dimensionnalité des interactions entre la morphologie bâtie et les ambiances urbaines, tout en s'inscrivant naturellement dans le choix conscient de favoriser le développement durable de l'humanité.

Enfin, cette thèse soulève une interrogation sur le type de société que nous désirons promouvoir et sur le développement de l'humanité (qui est fondamentalement éthique et pas seulement financier). Le temps est venu de tenir compte de l'importance fondamentale de la notion de qualité et de son rôle dans la production des phénomènes quantitatifs observables. Nous avons la certitude que la question du développement durable de l'humanité est un pas vers une transformation plus profonde : c'est vers une transmutation de l'être humain et de sa relation au monde que se porteront les recherches de demain. Ainsi, le développement durable serait une marche, un pallié entre croissance et transmutation. Ce doctorat a été rédigé dans le but de participer à une prise de conscience collective, qui ne peut se réaliser que par la sensibilisation du public, la formation des concepteurs de projets et l'information des décideurs politiques. **N'oublions pas que nous appartenons tous à des pays en voie de développement... durable ...**

Bibliographie

ANDRE-DUMONT Florence, **Le panel de citoyens : Quel Brabant wallon pour demain ? Vade-mecum d'une expérience de participation citoyenne**, Fondation pour les Générations Futures, Namur, 2002.

ANSAY Pierre, SCHOONBRODT René, **Penser la ville : choix de textes philosophiques**, Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles, 1989.

ARCHITECTURE ET CLIMAT, Gratia Elisabeth, Saelen Michel, **Opti-maisons**, Louvain-la-Neuve, 1998.

ARCHITECTURE ET CLIMAT, **Energie+, version 4 : conception et rénovation énergétique des bâtiments tertiaires**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2004.

ARENDRT Hannah, **Condition de l'homme moderne**, Ed. Calmann-Lévy, Paris, 1983.

ARENS E., LEE E. S., BAUMAN F., FLYNN L., **SITECLIMATE: a program to create hourly Site-specific Weather Data**, 1985

ASHRAE, **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, ANSI/ASHRAE Standard 55-1981, 1981.

ASHRAE, **Airflow around buildings**, in ASHRAE Handbook-Fundamentals, American Society of Heating, refriger. And air-cond., 2001

ASHRAE, **Thermal comfort**, in Ashrae Handbook-Fundamentals, American society of Heating, Refrigerating and air conditioning, 2001.

ATU, **Travail urbain, espace public et démocratie locale**, Cahier n°1- Atelier de Travail Urbain de Grande-Synthe, 1995.

AULICIEMS A., **Thermal comfort**. In Building Design and Human Performance. New York: Ruck. 1989.

BAETKE F., WERNER H., WENGLER H., **Numerical simulation of turbulent flow over surface mounted obstacles with sharp edges and corners**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 35, 1990, 129-147.

BAKER Nick, **We are all outdoor animals**. In Koen Steemers and Simos Yannas, Architecture City Environment, Proceedings of PLEA 2000. London: James and James. 2000.

BAKER N., STEEMERS K., **Energy and Environment in Architecture : A Technical Design Guide**, E&FN Spon, Londres, 2000

BAKER N., **Designing for comfort, Recognising the Adaptive Urge**. Cambridge: Martin Center for Architectural and urban Studies, 2001.

BERANEK W.J., **Wind environment around single buildings of rectangular shape**. Heron 29-1:3-33. 1984.

BERQUE Augustin, **Médiance, de milieu en paysage**, GIP RECLUS, Montpellier, 1990.

BERQUE Augustin, **Etre humains sur la terre, principes d'éthique de l'écoumène**, Gallimard, 1996.

BERQUE Augustin, **ECOUMENE, Introduction à l'étude des milieux humains**, Editions Belin, France, 2000.

BERTRAND M. J., LISTOWSKI H., **Les places dans la ville**, Les pratiques de l'espace, Dunod, Paris, 1984.

BLASCO M., **Cours UCL Acoustique 2001-2002: Partie théorique (AMCO 2361 : partie acoustique)**.

BLOCKEN B., ROELS S., CARMELIET J., **Pedestrian wind conditions in passages through buildings- Part 1. Numerical modelling, sensitivity analysis and model validation**, research report, Laboratory of Building Physics, KULeuven, 2003.

BLOCKEN B., ROELS S., CARMELIET J., **Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004.

BODART Magali, **Principes de base de l'éclairage naturel et des études en modèles réduits**, cours UCL, Université catholique de Louvain, 2007.

BODEUX A., **La vitesse et la direction du vent en Belgique**, Institut Royal Météorologique, Bruxelles, 1977.

BOSELDMANN P., DAKE K., FOUNTAIN L., KRAUS L., HARRIS L., HARRIS A., **Sun, Wind and Comfort: Study of Thermal Comfort in San Francisco**. Berkeley: Centre for Environmental Design Research, University of California. 1988.

BOTTEMA Marcel, **Wind climate and urban geometry**, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1993.

BOTTEMA Marcel, **Towards rules of thumb for wind comfort and air quality**, Atmospheric Environment 33, 1999, p. 4009 à 4017.

BOTTEMA Marcel, **A method for optimisation of wind discomfort criteria**, Building and Environment 35 : 1-18, 2000.

BROWN, R.D. & GILLESPIE, T.J., **Microclimate Landscape Design, creating thermal comfort and energy efficiency**. Canada: John Wiley & Sons. 1995.

BROWN G.Z., DEKAY M., **Sun, Wind & Light : Architectural Design Strategies**, 2d edition, John Wiley & Sons, New York, 400 p., 2001.

Bureau Fédéral du Plan, **Plan Fédéral pour un Développement Durable 2000-2004**, Belgique, 2000.

CARLES José Luis, BARRIO Isabel Lopez, DE LUCIO José Vicente, **Sound influence on landscape values**, Landscape and urban planning 43 :191-200, 1999.

CEE, **Livre vert sur l'environnement urbain : communication de la Commission au Conseil et au Parlement**, Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes, 1990.

CEE, **Energy Conscious Design, a primer for architects**, Batsford, Bruxelles, 1992.

CEE (1992b), **Energy in architecture. The European Passive Solar Handbook**, Batsford, Bruxelles, 1992.

CEE, Groupe d'experts sur l'environnement urbain, direction générale XI : environnement, sécurité nucléaire et protection civile, **Villes durables européennes, rapport**, Bruxelles, mars 1996.

CEE (1996b), "**Design source book on passive solar architecture**", Santamouris & Asimakopoulos, Athènes, 1996.

CEE, **Villes cyclables, villes d'avenir**, Luxembourg, 1999.

CEE, **Vers une stratégie thématique pour l'environnement urbain**, Communication de la Commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions, Bruxelles, 2004

CEE (2004b), **Reclaiming city streets for people. Chaos or quality of life?** Luxembourg, 2004.

CEE (2004c), PROPOLIS, **Planning and research of policies for land use and transport for increasing urban sustainability**, final report, 2004

CERMA, **Proceedings of the First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment**, G. Hégron, Nantes, 2002.

CEESE, **Mobilité durable en Région Bruxelloise**, rapport final, Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement, ULB, Bruxelles, 2001.

CHANDRA S., FAIREY PW, HOUSTON M.M., **A handbook for designing ventilated buildings**, Final report FSEC-CR-93-83. Florida Solar Energy Centre, Cap Canaveral, Florida, 1983.

CHELKOFF Grégoire, **Ambiances Sonores Urbaines**, Actes des 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

CHENG François, **L'éternité n'est pas de trop**, éd. Albin Michel, Paris, 2002.

CHOAY Françoise, **La règle et le modèle, Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme**, Editions du seuil, 1980.

COMPAGNON R., GOYETTE-PERNOT J., **Visual Comfort in Urban Spaces**. In: CEE, **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach**, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

CONSEIL FEDERAL DU DEVELOPPEMENT DURABLE., **Avis cadre pour une mobilité compatible avec le développement durable**, Belgique, 2004.

CONVIVE, **Végétalisation du Milieu construit, Pourquoi?**, Journée du CUEPE 1995 « Energie et climat urbain », Genève, 1995.

CPDT, **Le patrimoine bâti, outil de développement territorial**. ULB (IGEAT) – UCL (CREAT). Ministère de la Région wallonne, 2002.

CRETTON P., **Ecobilans. Les infrastructures : quels impacts?** Cycle d'études postgrades et master européen en architecture et développement durable. Louvain-la-Neuve, 2000.

CULJAT B., ERSKINE R., **Climate-responsive social space: a Scandinavian perspective**, In J. Mänty et N. Pressman (eds), *Cities Designed for Winter*. Helsinki, 1998.

DE ASIAIN J. L., **The making of the urban environment**, in Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

DECROLY Jean-Michel, ROUYET Yves, **La féodalisation de la ville. Les clos privés à Bruxelles**. Dans : Les cahiers de l'urbanisme n°32, Ed : Pierre Mardaga. Et Direction générale de l'aménagement du territoire, du logement et du patrimoine de la Région wallonne. 2002.

DE CLERCQ Matthieu, **Elaboration d'un système expert d'aide à l'intégration de la problématique du vent au niveau du piéton dans la conception architecturale**, mémoire UCL, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2000.

DE DEAR Richard, BRAGER Gail, COOPER Donna, **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, Final Report**. ASHRAE RP- 884. 1997.

DE DEAR RJ, BRAGER G.S. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55** ». Energy and Buildings 34: 549-561. 2002.

DEFRISE P., A. Quinet, **Le vent**, documentation météorologique, Institut royal météorologique de Belgique, Gembloux, 1973.

DE HERDE André, **Le manuel du Responsable énergie. L'utilisation rationnelle de l'énergie dans le tertiaire**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 1994.

DE MYTTERAERE, **Vers une Architecture Soutenable**, thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2006.

DEPREZ Bernard, **Cours d'équipements, thermique et confort du bâtiment**, La Cambre, 2003.

DE ROSNAY Joël, **Le macroscopie, vers une vision globale**. Editions du Seuil, Paris, 1975.

- DE SAINT-EXUPERY Antoine, **Le Petit Prince**, Paris, Gallimard, 1946.
- DE SCHILLER S., **Sustainable cities: contribution of urban morphology**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.
- DE SHILLER Silvia, EVANS John Martin, Delbene Claudio, **Sustainable urban Planning developing tools for the planners**, in Proceedings of Plea 96, Louvain-la-Neuve, 1996.
- DE SCHUTTER G., GRYSEELS M., KEMPENEERS S., **Biodiversité en Région de Bruxelles-Capitale: la nature de Bruxelles**, Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Biologie, 70-suppl.: 35-39, 2000.
- DIMOUDI A., NIKOLOPOULOU M., **Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, 2000.
- DOCHERTY M., SZOKOLAY Steven V., **Climate analysis**. PLEA notes 5: University of Queensland. 1999.
- DOULOS L., SANTAMOURIS M., LIVADA I., **Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials**, Solar Energy 77: 231-249, 2004.
- DURGIN F.H., **Pedestrian level wind criteria using the equivalent average**, Journal of Wind Engineering., 1997
- ESOURROU G.: **Le climat et la ville**, Nathan Université, 1991.
- ESOURROU Gisèle, **Les particularités du climat urbain**, Journée du CUEPE 1995 « Energie et climat urbain », Genève, 1995.
- ESCODERO N., **La mobilité dans la ville, une composante essentielle du développement urbain durable**, thèse de doctorat, UCL, 2004.
- FANGER P.O., **Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering**. USA: Mc Graw-Hill Book Company, 1970.
- FJELD T., **The Effect of Indoor foliage plants on the Health and Discomfort Symptoms among Office Workers**. Indoor Built Environment 7. 1998.
- FOLCHER Alain, **Modification de la structure du vent en zone urbaine**, CAHIERS DU CSTB n° 2385, 1990
- FONTAINE Thierry, **Architecture, urbanisme et climat : le vent**. Travail de fin d'études, Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 1984.
- FRANKE J., HIRSCH C., JENSEN A.G., KRUS H.W., SCHATZMANN M., WESTBURY P.S., MILES S.D., WISSE J.A., WRIGHT N.G., **Recommendations on the use of CFD in wind engineering**, in: Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, COST Action C14, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse (Belgique), 2004.

GADILHE A., **Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47, 1993, 755-763, Elsevier.

GANDEMER J., **Wind environment around buildings : aerodynamic concepts**, in : Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, p. 423-432, 1975.

GANDEMER J., **Inconfort dû au vent aux abords des bâtiments : concepts aérodynamiques**, Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment n°170, Paris, 1976.

GANDEMER J., **Aerodynamic studies of built-up areas made by CSTB at Nantes, France**. J. Ind. Aerodyn; 3; 227 – 40. 1978.

GANDEMER J., **Le confort et le vent dans les espaces extérieurs**, CSTB Magazine, 1982.

GANDEMER J., BARNAUD G., **Inconfort dû au vent aux abords des bâtiments. Etude aérodynamique de vitesse dans les ensembles bâtis : étude complémentaire**, CSTB, Paris, 1975

GANDEMER J., GUYOT A., **La protection contre le vent, Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques**, CSTB, Paris, 1981.

GAY Jean-Bernard, **Environnement et climat- Critères et indicateurs du développement durable**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

GAY Jean-Bernard (2004-b), **Confort et santé – Isolation acoustique**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

GEIGER Rudolf, **The climate near the ground**, revised edition, Harvard College, USA, 1980.

GEORGAKIS C., SANTAMOURIS M., **Development and validation of a model to calculate wind speeds in urban canyons**, AIVC 26^{ème} conférence, Bruxelles, 2005.

GEROS V., SANTAMOURIS M., KARATASOU S., TSANGRASSOULIS A., PAPANIKOLAOU N., **On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment**. Energy and Buildings 37 : p243-257, 2005

GHIAUS C., ALLARD F., SANTAMOURIS M., GEORGAKIS C., NICOL F., **Urban environment influence on natural ventilation potential**, Building and environment n°41, p.395-406, 2006.

GIEC, **Rapport de synthèse sur les changements climatiques 2001**, Cambridge University Press, 2001.

GHORRA-GOBIN Cynthia, **Les espaces de la médiation**; réinventer les « espaces publics » comme symbole de la médiation, Commission nationale française pour l'UNESCO- Paris, 2000.

GHORRA-GOBIN Cynthia (2000-b), **Etats-Unis : gated communities et private cities**, Urbanisme n°312 p.67, 2000.

GILLOT Christian, **La place et la ville, notes sur l'ouverture**, thèse de doctorat UCL, Louvain-la-Neuve, 1995.

GILLOT Christian, **Éléments de structure de la ville et du territoire, documents de références**, cours UCL, 1999, Louvain-la-Neuve.

GILLON Jean-Marie, **Les places publiques. Un enjeu local et régional...**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2002.

GIVONI B., **Man, Climate and Architecture**, UK: Elsevier Architectural science series. 1969.

GIVONI B., **Climate considerations in building and urban design**. Van Nostrand Reinhold, 443 pages. 1998.

GLAUMANN M., WESTERBERG U., **Klimatplanering vind**, Svensk Byggtjänst, Akersberga, 1988.

GODART O., **Modification du climat à Louvain-la-Neuve. Une évolution à suivre**, Extrait de 'Ciel et Terre' vol. 87 n°4, 1971.

GONTIER Pascal, **Constitution de la forme urbaine et développement durable**, mémoire de DEA, EPFL 2000.

GRATIA E., DE HERDE A., **Concevoir avec le climat: la maison individuelle**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2002.

GRATIA E., BRUYERE I., DE HERDE A., **How to use natural ventilation to cool narrow office buildings**, Building and Environment, Université Catholique de Louvain, 2004

GRATIA E., DE HERDE A., **Thermique des immeubles de bureaux**, Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-neuve, 2006.

GRECO-ERAC & al., **A l'écoute d'une ville. Evaluation quantitative de la qualité du confort urbain vis-à-vis du bruit des transports**, dans ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

GREENPEACE, **Energy revolution, a sustainable pathway to a clean energy future for Europe**, rapport Greenpeace, 2005.

GRUNDSTROM K., JOHANSSON E., MRAISSI M., OUAHRANI D., **Climat et Urbanisme, La relation entre le confort thermique et la forme du cadre bâti**, Lund University & Laboratoire Public d'essais et d'Etudes (Maroc), Lund, 2003.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Control climatico en espacios abiertos, proyecto EXPO'92**, Ciemat, Séville, 1994.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Control climático en espacios abiertos, evaluación del proyecto EXPO'92**, Ciemat, Séville, 1994.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Guia basica para el acondicionamiento climático de espacios abiertos**, Ciemat, Séville, 1994.

GUSTAVINO C., **Perception of Background Noise in Urban Soundscapes**, Nantes, 2001.

GUSTAVINO Catherine, DUBOIS Danièle, ARRAS Christine, **Etude sémantique de la perception des basses fréquences dans les bruits de transports terrestres. Application à l'appréciation qualitative des ambiances sonores urbaines**, in : ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

HAGAN S., **Sardines and Tins : Is « Densification » Sustainable ?**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

HALL Edward T., **La dimension cachée**, Editions du Seuil, Paris, 1971.

HALL R.C., **Evaluation of modelling uncertainty. CFD modelling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU final report**, European Commission Directorate- General XII Science, Research and Development Contract EV5V-CT94-0531, WS Atkins Consultants Ltd., Surrey, 1997.

HALLEUX Jean-Marie, **Désurbanisation et développement durable**, Master européen en développement durable, UCL, Louvain-la-Neuve, 2005

HAMDOUN Anas, **Etude de l'environnement sonore urbain à la place Paul Doumer**, Rapport de stage de fin d'étude dans le cadre du Master Mécanique et Ingénierie, GRECAU, Ecole d'architecture et de paysage de Bordeaux, Bordeaux, 2004.

HAMMOUD Hassan, **L'impact du vent sur la forme externe de l'habitat**, Travail de fin d'études, Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 1986.

HAVENITH George, HOLMER Ingvar, PARSONS Ken, **Personal factors in thermal comfort assessment : clothing properties and metabolic heat production**, Energy and Buildings, vol 34, n°6, juillet 2002, p. 581-591.

HEIDEGGER Martin, **Essais et conférences**, éditions Gallimard, Saint-Amand (France), 1958.

HEISLER G.M., DEWALLE D.R., **Effects of Windbreak Structure on Wind Flow**, Agriculture, Ecosystems and Environment, 22/23, p.41-69, 1988.

HEISLER G.M., **Mean wind speed below building height in residential neighbourhoods**, Controlling Summer Heat Islands, LBL-27872, 1989.

HOPPE Peter, **Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort**. Energy and Buildings 34, 2002.

HOTCHKISS RS, HARLOW FH, **Air Pollution and transport in street canyons**, Office of research and monitoring, Washington DC, USA, 1973.

HUNTINGTON Ellsworth, **Principles of Human Geography**. 6th edition. New York: John Wiley and Sons, 1951.

IBGE, AED-BUV, **La lutte contre le bruit en milieu urbain dans la région de Bruxelles-capitale**, Données de base pour le plan. Les Carnets de l'Observatoire, Bruxelles, 1998.

IBGE, **Question bruit, nous voulons vous entendre**. Plan de lutte contre le bruit 1999-2004. Enquête publique, Bruxelles.

IBGE, **L'état de l'environnement en Région de Bruxelles-Capitale**, Rapport de Synthèse, IBGE-BIM, Bruxelles, 2002.

IMBE, **Quartiers durables, Guide d'expériences européennes**, Arene (France), 2005

ISYUMOV N., DAVENPORT AG, **The ground level wind environment in built-up areas**. In: Proceedings of Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, UK: Cambridge University Press, 1975.

IZARD Jean-Louis, Guyot Alain, **Archi bio.**, éditions Parenthèses, Roquevaire, 1979

JACKSON P.S., **The evaluation of windy environments**. Build environment 13:251-60, 1978.

JAMIESON NJ., CARPENTER P., CENEK P.D., **The effect of architectural detailing on pedestrian level wind speeds**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, p. 2301-2312, 1992.

JIMENEZ Alcala B., **Environmental Aspects of Hispano-Moslem Architecture**, PhD, AA EE, Londres, 2002.

JOHANSSON Erik, **Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate : A study in Fez, Morocco**, Building and Environment, 2005.

JOUKOFF A., **Brussels urban solar microclimate**, , PLEA 96, Institut Royal Météorologique de Belgique

JUNG Carl Gustav, **Commentaire sur le mystère de la fleur d'or**, spiritualités vivantes, Ed. Albin Michel, 1994.

KANG J., YANG W., ZHANG M., **Sound Environment and Acoustic Comfort in Urban Spaces**. In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

KASTNER-KLEIN P., FEDOROVITCH E., ROTACH M.W., **A wind tunnel study of organised and turbulent air motions urban street canyons**, Journal of wind engineering and aerodynamics, vol 89, 849 -861, 2001.

KAHN Louis I., **What the City should be**, in : *Louis I. Kahn Silence et lumière*, éditions du linteau, Douai, 1996.

KIM Sung-Eun, BOYSAN Ferit, **Application of CFD to environmental flows**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 1999, 145-158

KOSTOF Spiro, **The city assembled. The elements of urban form through history**. Thames & Hudson, Londres, 1992.

KRISTENSEN P. E., **Climatic design of a new housing area**, Plea96.

KUKADIA D.V., **Ventilation and air pollution. Strategies for buildings located in Urban Areas**, Oscar Farber Group Ltd., Air Infiltration Review, vol. 18, n°3, 1997

LADRIERE Jean, **Vie sociale et destinée**, Editions Duculot, Gembloux, 1973.

LANDSBERG H. E. , **The Urban Climate**, International geophysics series, ed. W.L.Donn. Vol.28, 275 pages. Academic Press, Londres. 1981.

LAWSON T.V., **The wind environment of buildings : a logical approach to the establishment of criteria**. University of Bristol, Department of Aeronautical Engineering, 1973.

LAWSON T. V., PENWARDEN A. D., **The effects of wind on people in the vicinity of buildings**. In: Proceedings of Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, UK: Cambridge University Press, 1975.

LAWSON T.V., **The wind content of the built environment**. J Ind Aerodyn 3;93-105, 1978.

LAWSON T.V., **The Determinatin of the Wind Environment of a Building Complex Before Construction**, Bristol, 1990.

LET (Laboratoire d'Economie des Transports – Université Lyon 2), LTMU (Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines (Université Paris 8), **ETHEL – Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisations**, rapport final, Paris, 2006.

LEFEBVRE Henri, **Le droit à la ville**, suivi de **Espace et politique**, Editions Anthropos, Paris, 1972.

LELOUP Xavier, **La Ville de l'Autre, Effets de composition et registres du rapport à l'Autre dans un espace pluriel (Ixelles)**, thèse de doctorat UCL, 2002.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Guide de l'architecture bioclimatique. Haute qualité et développement durable**. Tome I, Ed : Systèmes solaires, Chaumont cedex, 1996.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Guide de l'architecture bioclimatique. Haute qualité et développement durable**. Tome III, Ed : Systèmes solaires, Langres, 2001.

LIEBARD A., DE HERDE A., GROSJEAN B., CHABAUDIE J., REITER S., **Guide de l'architecture bioclimatique. Tome 6 : Aménagement urbain et développement durable en Europe**, Ed : Systèmes solaires, Langres, 2004.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable**. Observ'ER, Baume-les-Dames, 2005.

LE GOFF Olivier, **L'invention du confort, naissance d'une forme sociale**, Presses universitaires de Lyon, France, 1994.

LIMB Mark, **Impact of Urban Air Pollution on the Indoor Environment : An Annotated Bibliography**, New AIVC Publications, Oscar Faber Group LTD, 1999

LITTLEFAIR Paul, **Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment**, Solar energy vol 70 n°3, p. 177-185, 2001.

LITTLEFAIR P.J., AIZLEWOOD M.E., **Calculating access to skylight, sunlight and solar radiation on obstructed sites in Europe**. BRE Report BR 379. Garston, CRC, 1999.

LITTLEFAIR P.J., SANTAMOURIS M., ALVAREZ S. DUPAGNE A., HALL D., TELLER J., CORONEL J.F., PAPANIKOLAOU N., **Environmental Site Layout Planning : Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas**, Building Research Establishment, London, 2000.

LOUWERS Marc, **Caractérisation de la qualité perçue du bruit routier. Mise au point d'une méthode d'investigation multimodale**. Dans ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

LOZANO E.E., **Visual needs in the urban environment**, Town Planning review, vol.45, n°4, 1974.

MAHAUT Valérie, **Comment l'eau traverse-t-elle la question de l'architecture, ou suivant quel processus l'eau est un média d'architecture et d'urbanisme ?**, Mémoire de DEA, UCL, 2005.

MALET L. M., **Le vent dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère, Pourquoi et comment déterminer le vent standard de surface ?**, Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles, 1989.

MANINS P.C., COPE M.E., HURLEY P.J., NEWTON P.W., SMITH N.C., MRQUEZ L.O., **The impact of urban development on air quality and energy use**. 14th International Clean Air and Environment Conference, Melbourne, 1998.

MARTIN Nicole, **Jusqu'où pourrions-nous désurbaniser nos territoires ?**, Espace-vie, aménagement du territoire, urbanisme et environnement, n°134, janvier 2003, Centre culturel du brabant wallon, Court-St-Etienne, 2003.

Mc CARTNEY K.J. and NICOL J. F. 2002. **Developing an adaptive control algorithm for Europe**. Energy and Buildings 34: 623-635.

Mc CARTNEY K., MATSIKA W., **An Evaluation of the Educational Effectiveness of Using the Bioclimatic Chart in a Design Exercise**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Eindhoven, The Netherlands, 2004.

Mc CORMICK R.A., **Air pollution in the locality of buildings**. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Vol A269, 1971, p.515-526.

MEIR I., **Courtyard microclimate**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

MELBOURNE W. H., JOUBERT P. N., **Problems of wind flow at the base of tall buildings. Procesings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures**, Tokyo, 1971.

MELBOURNE W.H., **Criteria for environmental wind conditions**, J. Ind Aerodyn 3, 1978.

MEUNIER Sabine, **Critères psychoacoustiques des nuisances sonores : évaluation perceptive de bruits de circulation routière et ferroviaire**.2001

Meunier S., **Approche multicritères des nuisances sonores**, dans G2AU/ GSO (Groupe spécialisée acoustique architecturale et urbaine / Section régionale grand Sud-ouest) , La place des ambiances sonores dans l'aménagement urbain et péri-urbain, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, juin 2001.

MERLEAU-PONTY Maurice, **Phénoménologie de la perception**, Ed. Gallimard, Paris, 1945.

MERLIN Pierre, CHOAY Françoise, **Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement**, ADAGP, Paris, 1996

MERONEY Robert N., LEITL Bernd M., RAFAILIDIS Stillianos, SCHATZMANN Michael, **Wind-tunnel and numerical modelling of flow and dispersion about several building shapes**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 1999, 333-345, Elsevier.

MERTENS André, **Louvain-la-Neuve. Une aventure urbanistique**, L'Harmattan, Paris, 2002.

Ministère de la Région Wallonne, **A comme ... aménagement**. Inspection Générale de l'Aménagement du territoire, Tournai, 1985.

MONTAVON M., SCATERZZINI J-L, COMPAGNON R., **Comparison of the solar energy utilisation potential of different urban environments**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven. P. 19-22, 2004.

MORIN Edgar, **Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur**, Seuil, Paris, 2000.

MORHAYIM L., **Rethinking "architecture for sustainability"**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

MURAKAMI S., UEHARA K., DEGUCH K., **Wind effects on pedestrians : new criteria based on outdoor observation of over 2000 persons**. In: Proceedings of Fifth International Conference on Wind Engineering. . p.277-88, CO, USA: Fort Collins, 1980.

MURAKAMI S., IWASA Y., MORIKAWA Y. **Study on acceptable criteria for assessing wind environment on ground level based on resident's diaries**. J. Wind Engineering Ind Aerodyn 24:1-18, 1986.

MURAKAMI Shuzo, MOCHIDA Akashi, HAYASHI Yoshihiko, **Examining the k-ε model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structures around a cube**. Institute of Industrial Science, Tokyo, 1990.

MURAKAMI S., MOCHIDA A., **On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 (1995) 191-211.

MURAKAMI Shuzo, **Current status and future trends in computational wind engineering**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67 & 68, 1997, 3-34

MURAKAMI S., **Overview of turbulence models applied in CWE-1997**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, 1998, 1-24

MURAKAMI Shuzo, OOKA Ryozi, MOCHIDA Akashi, YOSHIDA Shinji, KIM Sangjin, **CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 81, 1999, 57-81

NAKAMURA Y., OKE T.R. **Wind, temperature and stability conditions in an E-O oriented urban canyon's** , Atmospheric Environment, 1988

NARBONI Roger, **La lumière urbaine, éclairer les espaces publics**, Collection techniques de conception, Le Moniteur, Paris, 1995.

NASAR J.L., FISHER B., GRANNIS M., **Proximate physical cues to fear of crime**, Landscape and urban planning, 1993: 26: 161-178.

NBN B62-002 : Calcul des coefficients de transmission thermique des parois de bâtiments, Institut Belge de Normalisation, Bruxelles, 1987.

NBN B 03-002-1, Action du vent sur les constructions : généralités ; pression du vent sur une paroi et effets d'ensemble du vent sur une construction, deuxième édition, Institut belge de Normalisation, Bruxelles, 1988.

NEWMAN PW and KENWORTHY JR, 1989. **Gasoline Consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey**, Journal of American Planning Association, 55(1): 24-37.

NG E., WONG H.-H., **Building Heights and Better Ventilated Design for High Density Cities**, Plea 2005, The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Beirut, Liban, 2005.

NIACHOU K., HASSID S., SANTAMOURIS M., LIVADA I., **Comparative monitoring of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons**, Energy and Buildings 37 : p.503-513, 2005.

NICOL J.F., **Thermal comfort- A Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model.** London, 1993.

NICOL J.F., HUMPHREYS M.A., **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings,** *Energy and Buildings* 34: 563-572, 2002

NICOL F., WILSON M., **The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons,** *Energy and Buildings*, 36, p. 423-434, 2004.

NIKOLOPOULOU M., BAKER N., STEEMERS K., **Thermal comfort in outdoor urban spaces.** In *Proceedings PLEA 1998: Environmentally Friendly Cities.* James&James. 1998.

NIKOLOPOULOU M., LYKLOUDIS S., **Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries.** *Building and Environment*, vol. 41 (11), p. 1455-1470, 2006.

NIKOLOPOULOU M., STEEMERS K., **Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces.** In *Proceedings of PLEA 2000.* Cambridge, 2000.

NIKOLOPOULOU M., BAKER N., STEEMERS K., **Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter.** *Solar Energy* 70 (3): 227-235. 2001.

NIKOLOPOULOU Marialena, STEEMERS Koen, **Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces.** *Energy and Buildings* 35 (1):95-101. 2003.

NIKOLOPOULOU M., LYKLOUDIS S., KIKIRA M., **Thermal Comfort Models for Open Urban Spaces.** In: CEE, *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach,* Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

NORBERG-SCHULZ Christian, **Genius Loci. Paysage, ambiance, architecture.** Pierre Mardaga, Sprimont (Belgique), 1981.

NORBERG-SCHULZ Christian, **A la recherche d'un langage contemporain de l'architecture,** Institut Supérieur d'Architecture Saint-Luc, Bruxelles, 1988.

NORBERG-SCHULZ Christian, **L'art du lieu. Architecture et paysage, permanence et mutations,** La Moniteur, Paris, 1997.

OKE T.R., **Boundary layer climates.** University Press, Cambridge, 1987

OKE T R., **Street Design and Urban Canopy Layer Climate,** *Energy and Buildings*, 1988, vol11 p 103-113

OLGYAY Victor, **Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism.** New Jersey: Princeton university press. 1963.

OSELAND N.A., **A within-groups comparison of predicted and reported thermal sensation votes in climate chambers, offices and homes.** In *Healthy Buildings* 1, 1994.

PACIUK M., **The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction in workplace.** In Coming of age. USA: EDRA. 1990.

PANERAI Philippe, DEPAULE Jean-Charles, DEMORGON Marcelle, **Analyse urbaine**, éditions parenthèses, Marseille, 1999.

PAQUOT Thierry, **Homo Urbanus**, Essai éditions du félin, Paris, 1990.

PENWARDEN A. D., **Acceptable wind speeds in towns**, Building Science, 8, p.259-268, 1973.

PENWARDEN A.D., WISE A.F.E., **Wind environment around buildings**, Building research Establishment Report, London, 1975.

J. PICAUT, D. GAULIN et M. BERENGIER, **Identification des sources sonores urbaines**, dans G2AU/ GSO (Groupe specialise acoustique architecturale et urbaine / Section régionale grand Sud-ouest) , La place des ambiances sonores dans l'aménagement urbain et péri-urbain, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, juin 2001.

PITTS A., HOMEWOOD J., **Environmental issues in strategic and urban planning**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

PLUMLEY Harriet, **The design of Outdoor Urban Spaces for Thermal Comfort**, these de DEA, COLLEGE OF Environmental Science and Forestry, Syracuse, 1975.

POTVIN, A., **Assessing the microclimate of urban transitional spaces**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, 2000.

PROULX Jean, **De l'homo faber à l'homo sapiens**, Critère n°11, L'encyclopédie de l'agora, 1974.

PROUST Marcel, **A la recherche du temps perdu, Tome I**, Bibliothèque de la Pléiade, Paris, Gallimard, 1954.

RATTI C., BAKER N., STEEMERS K., **Energy consumption and urban texture**, Energy and Buildings, n°37, p.762-776, 2005.

REES William E., **Les empreintes écologiques urbaines : vers la durabilité des villes**, in : Le territoire urbain, Ressource pour le développement durable. Ceraa, Bruxelles, 2004.

REITER Sigrid, DE HERDE André, **L'éclairage naturel des bâtiments**. Belgique : Ministère de la Région Wallonne, 2001.

REITER Sigrid, **L'influence du microclimat sur le confort des piétons pour des espaces publics durables**, mémoire de DEA, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2003.

REMY Jean, VOYE Liliane, **Ville, ordre et violence**, Presses Universitaires de France, Paris, 1981.

REMY Jean, VOYE Liliane, **La ville et l'urbanisation, Modalités d'analyse sociologique**, Cabay, 1982.

RICCIARDELLI F., POLIMENO S., **Some experimental results concerning the characteristics of the wind flow in the canopy layer**. In: Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment, COST Action C14, ed: von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse, Belgique, 2004.

RODI W., **Comparaison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 1997, 55-75, Elsevier.

ROGERS Richard, **Des villes pour une petite planète**, Le Moniteur, Paris, 2000.

ROSENFELD A.H., **Mitigation of urban heat islands materials**, utility programs, updates, Energy and buildings n°22 (3), 255-265, 1995.

ROULET Claude-Alain, « **Qualité de l'environnement intérieur et santé dans les bâtiments** », EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) – Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment. 2002.

ROULET P.C. A., **Ventilation naturelle**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

SACQUET Anne-Marie, **Atlas mondial du développement durable**, éditions Autrement, 2002.

SAINT-AUGUSTIN, **Les Confessions**, Flammarion, Paris, 1997.

SANTAMOURIS M., ASIMAKOPOULOS D., **Passive cooling of buildings**, James & James, London, 1996.

SANTAMOURIS M., **Natural Ventilation in Buildings : A design Handbook**, F.Allard Editor, London, 1998

SANTAMOURIS M., **Energy and climate in the urban built environment**, James&James, Athènes, 2000.

SANTAMOURIS M., DASCALAKI E., KLITSIKAS N., PAPAKONSTANTINOU K., GEORGAKIS C., **On the impact of the urban environment on potential of natural ventilation**, in : Innovations in ventilation technology, 21st annual conference, The Hague, 2000.

SANTAMOURIS M., ASIMAKOPOULOS D. N., ASIMAKOPOULOS V. D., CHRISOMALLIDOU N., KLITSIKAS N., MANGOLD D., MICHEL P., TSANGRASSOULIS A., **Energy and climate in the urban built environment**, ed : Santamouris, London, 2001.

SANTAMOURIS M., PAPANIKOLAOU N., LIVADA I., KORONAKIS I., GEORGAKIS C., ARGIRIOU A., ASIMAKOPOULOS D.N., **On the impact of**

urban climate on the energy consumption of buildings, Solar Energy: 70, n3, pp201-216, 2001.

SCUDO Gianni, **Design of outdoor microclimatic control**, cycle d'études postgrades et master européen en architecture et développement durable, Louvain-la-Neuve, 2000.

SCUDO G., ELSA F., **Thermal comfort in urban spaces: streets and courtyards**. IN: The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Brazil, 2001.

SCUDO G., **Thermal comfort**, COST « Green structures and urban planning »-Milan, 2002.

SCUDO G, DESSI V., ROGORA A., **Evaluation of Radiant Conditions in Urban Spaces**, in CEE « Designing Open Spaces in the Urban Environment : a bioclimatic approach », Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

SEMIDOR Catherine, **cours : GRECO-Bordeaux**, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, 2002.

SEMIDOR Catherine, **"In town without my car!": a new urban soundscape**, in: PLEA 2003- the 20th conference on passive and low energy architecture- Santiago-chile, 2003.

SEMIDOR Catherine, **Ambiances sonores et espace public**, Cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, UCL, 2005.

SENNETT Richard, **Les tyrannies de l'intimité**, Ed. du seuil, Paris, 1979.

SERRES Michel, **les cinq sens**, Grasset, Paris, 1985.

SINOUE Maria, STEEMERS Koen, **Urban semi-enclosed spaces as climate moderators**, Plea2004, the 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

SITTE Camillo, **L'art de bâtir les villes : l'urbanisme selon ses fondements artistiques**, Seuil, Paris, 1996.

SMITH F., WILSON C.B., **A parametric study of airflow within rectangular walled enclosures**, Building and Environment: 12, p.223-230, 1977.

SNEYERS R., **Un modèle statistique de la répartition des vents en force et en direction. Application aux données d'Uccle (Bruxelles) et validité du modèle pour la Belgique**. Institut Royal Météorologique de Belgique, publications série B, n°107, 1980.

SNOY Th., **Développement durable et choix de consommation**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, architecture et climat, Louvain-la-Neuve, 2005.

SOLIGO Michael J., IRWIN Peter A., WILLIAMS Colin J., SCHUYLER Glenn D., **A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal**

effects, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77&78, 753-766, Elsevier Science Publisher, 1998.

STATHOPOULOS Th., WU H., **Generic models for pedestrian-level winds in built-up regions**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 (1995) p.515-525

STEEMERS Koen, **Cities, energy and comfort : a PLEA 2000 review**, Energy and Buildings n°1454, 2002

STEEMERS Koen, **Energy and the city: density, buildings and transport**. Energy and Buildings 35:(3-14), 2003.

STEEMERS K. A., RAMOS M.C., SINOUE M., **Urban morphology**, In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

STIB (Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles), **STIB 2020 : Visions d'avenir pour le transport public urbain à Bruxelles**, Bruxelles, 2004.

SFASTC (Services fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles), **Enquête nationale sur la mobilité des ménages, réalisation et résultats**, synthèse du rapport final, Plan d'appui scientifique à une politique de développement durable, Bruxelles, 2001

TAHA Haider, **Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat**. Energy and Buildings 25, 99-103, 1997.

TAKAKURA S., SUYAMA Y., AOYAMA M., **Numerical Simulation of Flowfield around Buildings in an Urban Area**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47, 1993, 765-771, Elsevier.

Tchekhov Anton, **La groseille à maquereau**, 1898.

THIBAUD Jean-Paul, **From situated perception to urban ambiances**, Laboratoire CRESSON, Nantes

TSANGRASSOULIS A., SANTAMOURIS M., **Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed facades**. Energy and Buildings, 35. 2003. p527-531.

ULRICH R.S., **View through a Window may influence Recovery from Surgery**, Science 224. 1984.

VAN EYCK A., **Un miracle de modération** dans 'Le sens de la ville', Paris, Seuil, 1972.

VAN MOESEKE G., **Influence du vent en milieu bâti sur la ventilation naturelle**, mémoire de DEA, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2004

VAN MOESEKE G., GRATIA E., REITER S., DE HERDE A., **Wind pressure distribution influence on natural ventilation potential for different incidences and environments densities**. Energy and Building, 37 878-88p, 2005.

VILLE DE GENEVE (service d'urbanisme), **Le bruit dans la ville**, Cahiers d'urbanisme, 1989

VENTURI Robert, **De l'ambiguïté en Architecture**, Dunod, Paris, 1999.

VISSER GTh. **Wind discomfort criteria: a literature study into and proposals for the use of uniform TNO wind discomfort criteria**. Report 80-02746, TNO-IMET-ST, Apeldoorn, NL 1980.

VON MEISS Pierre, **De la forme au lieu. Une introduction à l'étude de l'architecture**, Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 1993.

VOOS L., **Effets du vent sur la ventilation naturelle des maisons unifamiliales**, Université de Liège, Travail de fin d'études, 1978.

WILLEMSSEN E., WISSE J.A., **Accuracy of assessment of wind speed in the built environment**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, p 1183-1190, 2002.

WIERINGA J., Updating the Davenport roughness classification, J Wind Eng, 41 (1992) 357- 368)

WIREN B.G., **A wind tunnel study of wind velocities in passages between and through buildings**, in: Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, p. 465-475, Cambridge University Press, Heathrow, 1975.

WIREN B.G., **Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilative heat losses for a single family house**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 15 :15-26, 1983.

WHITELEGG J., **Transport for a Sustainable Future : the case for Europe**, Wiley, Chichester, 1993

WCED (World Commission on Environment and Development), **Our common futur**, Oxford University Press, 1987

WCED (World Commission on Environment and Development), **Notre avenir à tous**, édition du fleuve, Montréal, 1988. (*traduction en français du rapport Brundtland dont la référence en anglais est WCED 1987*).

YANG W., KANG J., **Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces**, Applied Acoustics: vol 66 n°2, p. 211-229, 2005.

YANNAS Simos, **Energy indices and performance targets for housing design**, Energy and buildings: 23, p. 237-249, 1996.