

ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA VÉGÉTATION SUR LE RAYONNEMENT ÉNERGÉTIQUE (AIDE À LA CONCEPTION ARCHITECTURALE ET URBANISTIQUE)

J. TELLER

*Laboratoire d'Études Méthodologiques Architecturales • Université de Liège,
Bât. D1, 15, avenue des Tilleuls, 4000, Liège.*

Résumé

La méthodologie que nous présentons ici s'adresse à tous les "aménageurs" de l'espace bâti, qu'ils soient architectes, urbanistes ou autres. Notre objectif est de leur permettre d'exploiter utilement les propriétés spécifiques de la végétation dans leurs projets, et plus particulièrement ses propriétés énergétiques. On connaît les nombreuses propriétés de la végétation et les multiples aspects de son interaction avec notre cadre de vie. Afin de permettre l'analyse simultanée de ces différents aspects, nous proposons une méthodologie basée sur une représentation composite du milieu végétal. Celle-ci est issue de la combinaison d'une modélisation paramétrique et d'une modélisation géométrique. C'est cette représentation composite qui permet l'évaluation de l'impact de la végétation sur le rayonnement énergétique solaire, selon ses composantes directe, diffuse et réfléchie.

Abstract

This methodology concerns all the "built space designers", were they architects, town planners or others. Our major goal is to put up tools and methods that enable them to take advantage of the great specificities of vegetation, and especially its thermal specificities. Our composite representation affords a media for the concurrent analysis of the many interactions between vegetation and built space. This representation consists in the combination of a parametric with a geometric model. It is used for the evaluation of the impact of vegetation on solar radiation, according to its direct, diffuse and reflected components.

Mots-clés : éclairage énergétique, végétation, représentation composite

Key-words : solar radiation, vegetation, composite representation

Introduction

Dans le contexte de l'aide à la conception d'un projet urbain ou architectural, nous nous intéressons ici à deux des multiples fonctions de la végétation, à savoir sa fonction spatiale et sa fonction climatique. Par "fonction spatiale", nous entendons l'utilisation de la végétation pour délimiter des espaces, pour préserver l'intimité du domaine privé, pour matérialiser des alignements etc. Outre cet aspect spatial ou visuel, la végétation peut également être utilisée à des fins micro-climatiques. On sait en effet que les espèces caduques sont relativement perméables en hiver, au moment où l'énergie solaire est recherchée, et opaques en été, lorsque l'on est confronté à des risques de surchauffe. La végétation, matériau par ailleurs "convivial" et esthétique, présente de ce fait des caractéristiques utiles de régulation énergétique.

Actuellement, les différents outils utilisés par les concepteurs pour mesurer les performances énergétiques de leurs projets ne permettent pas de prendre en compte le caractère spécifique de la végétation. Ces outils ignorent la variation du masque saisonnier et assimilent bien souvent la végétation à une masse opaque. Bien entendu, cette simplification ne peut être retenue dans le cadre de l'analyse de l'impact des espèces caduques sur le rayonnement énergétique solaire en conditions hivernales. La végétation doit impérativement être traitée d'une manière particulière, afin d'intégrer ses propriétés spécifiques comme la perméabilité, la variabilité du masque etc.

Nous nous proposons donc de mettre en place une méthodologie qui permette aux concepteurs de mesurer l'impact de la végétation dans leur projet d'aménagement. Nous nous attacherons ici à la mesure de l'impact de la végétation sur le micro-climat d'un site et plus particulièrement sur le rayonnement énergétique solaire.

Par ailleurs, nous souhaitons que la méthodologie mise en place permette de réaliser des évaluations dès le stade de l'avant-projet. Dupagne et al. (1995) montrent en effet que la marge de décision du concepteur se réduit au fur et à mesure de l'évolution du projet, depuis l'esquisse jusqu'aux plans de détails. Ainsi, par exemple, lors de l'esquisse ou de l'avant-projet d'un aménagement urbain, il est encore relativement aisé de modifier l'implantation d'un alignement d'arbres. Par contre, lorsque le projet est au stade de l'élaboration des plans d'exécution et de détails, cette même modification demande des efforts beaucoup plus considérables. Elle est en effet susceptible d'induire des modifications en cascade comme l'adaptation des fondations de la voirie, du tracé des réseaux de drainage etc (Maillet et al., 1993). Elle est donc également susceptible de mobiliser un nombre plus important d'intervenants, depuis les bureaux de techniques spéciales, jusqu'à certains partenaires publics.

Enfin, la végétation influence de nombreuses caractéristiques d'un site. Elle induit bien sûr une modification du micro-climat, mais également de ses propriétés spatiales (fermeture d'un espace par un alignement d'arbres par exemple), fonctionnelles (adaptation des fondations de la voirie pour dégager les volumes de terre nécessaires par exemple) etc. Nous souhaitons définir une méthode d'analyse générale, initialement dédiée à la mesure de l'impact de la végétation sur le rayonnement énergétique solaire, mais suffisamment ouverte pour pouvoir être ultérieurement complétée par d'autres évaluations.

Afin de répondre à ces différents objectifs, l'élaboration de la méthode d'analyse s'est déroulée selon deux axes complémentaires, à savoir un axe "modélisation de la végétation" et un axe "évaluations énergétiques solaires". La modélisation de la végétation ainsi que les évaluateurs sont conçus de manière à permettre à un architecte ou un urbaniste de sélectionner, positionner et dimensionner une espèce végétale en fonction de critères spatiaux et micro-climatiques dès le stade de l'avant-projet.

1. Modélisation de la végétation

Les différentes évaluations sont réalisées sur base d'une représentation informatique tridimensionnelle de l'ensemble du site étudié. Cette maquette informatique comprend les volumes enveloppes des bâtiments ainsi que la végétation (arbres, arbustes, haies etc). Les volumes bâtis ainsi que le terrain sont codés à l'aide d'un modeleur de solide traditionnel (le logiciel EXCEPTION®). La figure 1 est une perspective réalisée à partir d'une maquette de ce type (il s'agit de l'une des places de la future exposition internationale LISBOA'98). Nous présentons maintenant la manière dont la végétation va être définie par l'utilisateur.

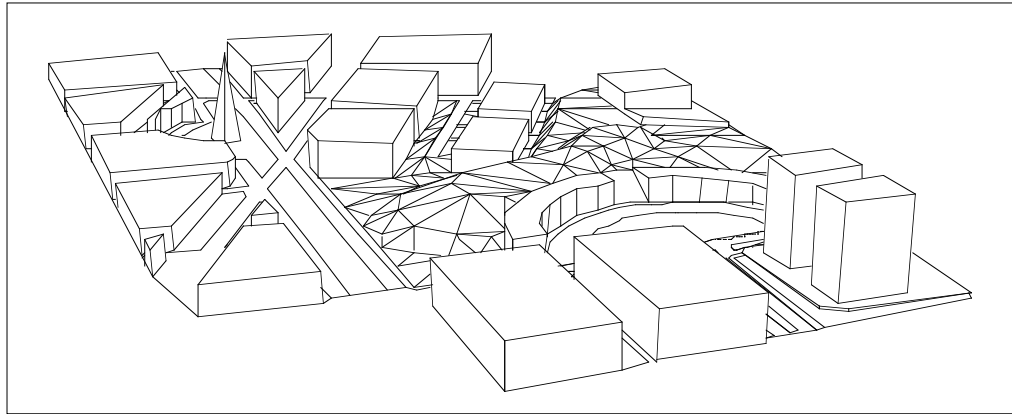


figure 1 - Axonométrie d'une maquette informatique 3D (constructions+terrain)

Comme nous l'avons déjà signalé, la végétation ne peut être assimilée à une masse opaque. Cette simplification serait bien trop défavorable dans le cadre d'analyses de l'impact d'espèces caduques en conditions hivernales. Les deux difficultés majeures pour une prise en compte correcte du caractère spécifique de la végétation dans le cadre d'analyses énergétiques sont i) de quantifier le masque d'une espèce végétale donnée et ii) la variabilité de ce masque selon les saisons. Aussi, nous proposons une méthodologie qui intègre ces deux aspects de la problématique sur base d'une représentation composite de la végétation, issue de la combinaison d'une modélisation paramétrique (bien adaptée aux évaluations spatiales) et d'une modélisation géométrique (destinée aux évaluateurs énergétiques).

1.1. Modélisation paramétrique - analyses spatiales

Cette modélisation répond à deux objectifs complémentaires : a) le concepteur doit pouvoir sélectionner et positionner les arbres qu'il désire utiliser dans son projet, b) il doit pouvoir rapidement visualiser et présenter une "projection" de son aménagement.

À cette fin, le couvert végétal est assimilé à son branchage, que l'on génère de façon algorithmique par une méthode tirée de Viennot et al. (1989). Cette méthode se base sur la relation étroite qui existe entre, d'une part, la morphologie "globale" de l'arbre (son port, sa silhouette, sa densité, ...) et, d'autre part, le comportement de ses parties les plus "locales" (les bourgeons) lors de la croissance. On sait par exemple que l'angle d'implantation du bourgeon sur la branche varie selon les espèces végétales. Cette caractéristique très locale de la croissance influence fortement les angles entre branches principales et branches secondaires (et donc la morphologie globale) de l'arbre adulte. Viennot et al. (1989) ont donc traduit différentes caractéristiques de la croissance (type de ramification, angles d'implantation, ...) en paramètres géométriques et topologiques adaptés à la plupart des espèces courantes.

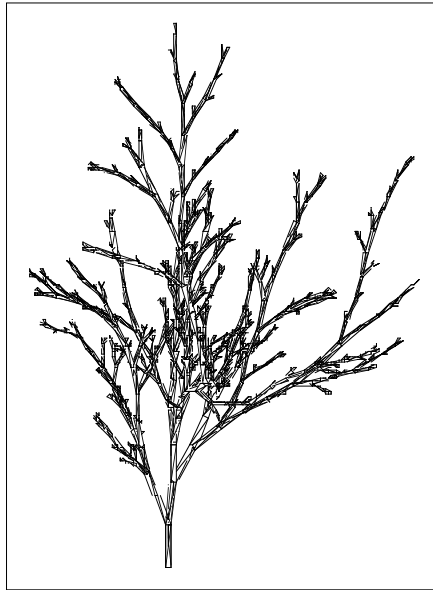


figure 2 - Perspective d'un arbre en cèpée "généralisé" par la méthode de Viennot et al. (1989)

L'algorithme de "généralisation" d'arbre établi par Viennot et al. (1989) reçoit en entrée ces paramètres de description de l'espèce choisie et construit les branches de l'arbre à partir du tronc jusqu'au rameaux terminaux selon un procédé aléatoire. Le résultat est un arbre virtuel composé d'une série de solides en 3D (200 à 300 volumes en moyenne) matérialisant les branches d'un arbre (voir figure 2). De cette manière, on réalise la description de la forme d'une espèce végétale donnée d'après une vingtaine de paramètres de croissance, à partir desquels il est possible de générer une instance de l'espèce avec une précision suffisante pour des opérations de conception. Ces arbres générés peuvent alors être intégrés dans la représentation informatique tridimensionnelle de l'ensemble du site étudié et visualisés à l'aide d'un outil de projection perspective.

1.2. Modélisation géométrique - analyses énergétiques

Il n'est pas possible d'utiliser directement les arbres générés sur base de la modélisation paramétrique pour les études énergétiques. Effectivement, on a vu que ceux-ci sont constitués de plusieurs centaines de volumes. Or, le temps de calcul des évaluations énergétiques est plus que proportionnel au nombre de volumes décrivant le site étudié. Il a donc été nécessaire de mettre au point un autre modèle de la végétation (modèle géométrique), mieux adapté aux évaluations énergétiques.

Dans le modèle géométrique, la végétation est représentée au travers de ses "volumes enveloppes" auxquels sont associés des attributs décrivant leurs propriétés physiques, les masques saisonniers en l'occurrence. Dans un premier temps, nous avons distingué 6 grands types de ports d'arbres auxquels correspondent 6 volumétries types (figure 3). De cette manière, un platane par exemple est représenté par deux volumes enveloppes (un pour le tronc et un pour le feuillage) au lieu des 200 volumes générés par le modèle paramétrique.

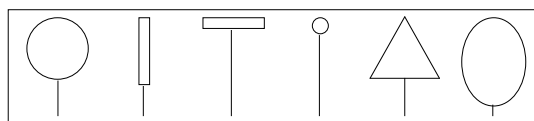


figure 3 - Différents ports d'arbres

Ensuite, nous avons défini le masque solaire de l'arbre comme le rapport entre intensité énergétique solaire interceptée par l'arbre et intensité énergétique solaire transmise. Il s'agit

d'un "masque propre" ramené à une unité de surface puisqu'il s'applique à une intensité énergétique (un petit buisson, très dense, a un masque propre plus important qu'un peuplier). Comme ce masque peut varier selon les saisons, on associe à chaque volume du site étudié ses 4 masques saisonniers. Pour le volume de feuillage d'une espèce caduque, un masque ordinaire est du type [30,60,70,50]. Pour un volume opaque, comme une construction ou le tronc d'un arbre, ce masque est de [100,100,100,100].

1.3. Le modèle composite de la végétation

On voit donc que, dans le cadre de l'aide à la conception, une modélisation de la végétation doit répondre à deux objectifs assez distincts. Le premier objectif est de fournir à l'utilisateur un support interactif afin qu'il puisse sélectionner, dimensionner et positionner des espèces végétales dans un environnement construit. Un deuxième objectif est de fournir une description de la végétation utilement exploitable par les outils d'évaluation du projet. Il s'agit dans notre cas d'outils d'évaluation du masque énergétique. Ces deux objectifs peuvent, on l'a vu, entrer en conflit. Ainsi, par exemple, ce qui est recherché lors du positionnement, c'est une représentation la plus réaliste possible des arbres, de leur ramification ainsi que de leur feuillage. Par contre, pour les évaluations énergétiques, la fidélité "visuelle" de la représentation importe peu, mais l'économie de la représentation (minimum de volumes possible) prend alors une importance fondamentale étant donné le nombre de calculs à effectuer.

D'où l'intérêt d'une représentation composite du milieu végétal basée sur la combinaison des deux modèles. Cette combinaison permet toujours de tirer parti des atouts des deux modèles de manière autonome : lorsque l'utilisateur positionne un arbre il exploite la composante paramétrique de la modélisation, lorsque l'arbre est utilisé dans le cadre d'évaluations énergétiques, c'est la composante géométrique du modèle qui est utilisée. De plus, les deux composantes du modèle composite peuvent également être utilisées de manière complémentaire. Ainsi, il est possible d'inférer le masque associé au modèle géométrique sur base des informations de la modélisation paramétrique. En effet, à partir des paramètres de génération, on peut calculer un certain nombre de caractéristiques morphologiques de l'arbre comme sa compacité, sa densité, ... Le masque d'une espèce donnée est lié à ces caractéristiques morphologiques et nous avons formulé une méthode d'approximation du masque végétal basée sur les paramètres de génération (Teller, 1992).

Le concepteur choisit les espèces qu'il désire intégrer dans son projet à l'aide d'un outil de base de données végétales interactive répertoriant une série d'arbres couramment utilisés. Notre prototype contient une vingtaine d'espèces différentes. La description de chaque arbre contient une représentation composite de l'arbre (représentation paramétrique + représentation géométrique) ainsi qu'une série d'informations "botaniques" et écologiques : hauteur moyenne, humidité et type de terre conseillés, nom commun et nom scientifique de l'espèce, type de feuillage (caduque, marescent ou persistant), ... Cet outil permet à l'utilisateur de sélectionner les arbres qu'il désire utiliser d'après les caractéristiques de l'environnement du projet (humidité, type de sol, etc) ainsi que certains critères fonctionnels (hauteur souhaitée, ...). Lorsque l'utilisateur a choisi une espèce, il peut positionner l'arbre sélectionné dans la maquette du site et composer ainsi un projet d'aménagement végétal.

2. Les évaluations énergétiques

Une fois que l'utilisateur a codé les volumes enveloppes des bâtiments ainsi que toute la végétation, il peut procéder à différents types d'évaluations. La maquette peut par exemple être utilisée pour des analyses "visuelles" : perspectives, simulation de déplacements, ... Nous présentons à présent comment elle peut servir à réaliser des analyses de l'impact de la

végétation sur le rayonnement énergétique solaire.

Rappelons tout d'abord que nous souhaitons que ces évaluations permettent de réaliser des analyses dès le stade de l'avant-projet (voir introduction). A ce stade d'avancement, la définition géométrique des bâtiments ainsi que leurs implantations sont encore susceptibles d'être fortement modifiées au cours de l'évolution du projet. L'expérience du laboratoire a montré que, vu l'imprécision des données relatives au projet, beaucoup d'analyses sont basées sur la comparaison, que ce soit avant et après aménagement, entre différentes variantes d'un projet ou entre un projet et une situation de référence bien connue.

L'importance des analyses comparatives nous a conduit à privilégier les méthodes de calcul simples, nécessitant peu de paramètres, qui permettent de "tester" plusieurs hypothèses de projet sans que cela nécessite de trop lourds codages de données. C'est pour cette raison que les méthodes dites "analytiques" ont toujours été préférées aux méthodes fondées sur des données statistiques, qui exigent nécessairement la récolte et le codage de nombreuses informations.

Notre méthode d'analyse de l'impact de la végétation sur l'éclairement énergétique solaire se base sur la comparaison entre valeurs d'éclairement avec et sans aménagement végétal en un certain nombre de points d'analyses. Ceux-ci peuvent être situés sur les mailles d'une grille de référence, au centre d'un vitrage, sur une toiture etc. Dans tous les cas, les caractéristiques particulières de la végétation, perméabilité et variabilité saisonnière du masque, doivent être prises en compte de façon différente selon le type d'éclairement énergétique que l'on considère : l'éclairement énergétique direct, diffus ou réfléchi.

2.1. Éclairement direct.

a) Détermination des heures mensuelles de masque.

La détermination de l'éclairement direct en un point du site est un problème angulaire. En pratique, cette analyse se réduit à un calcul de géométrie sphérique. Notre méthode de calcul consiste à projeter successivement sur une sphère de rayon unitaire, centrée sur le point d'analyse, a) tous les volumes de la scène et b) la trajectoire du soleil en un jour de l'année (en pratique on travaille avec 12 jours types pour obtenir les éclaircissements mensuels moyens). A partir de là, nous déterminons, toujours sur cette sphère, les points d'intersection entre les faces projetées et chaque parcours solaire. Ces points, s'ils existent, correspondent aux heures d'interception du soleil par ces faces.

Le masque associé à ces heures d'interception du soleil varie selon le type de volume étudié (arbre, bâtiment, ...) et le mois auquel ces heures se rapportent. Le calcul est effectué pour tous les mois de l'année et tous les volumes de la maquette. Il nous fournit, pour chaque mois de l'année, une liste d'heures de masque (il s'agit des heures auxquelles le masque change) et le masque qui leur est associé pour le point étudié.

b) Calcul du masque direct.

Il faut connaître l'intensité énergétique solaire directe à chaque heure de la journée pour mesurer l'impact énergétique de la végétation sur le rayonnement solaire. Ces valeurs horaires de l'éclairement direct sont généralement publiées par les instituts météorologiques nationaux, mais il est également possible de les déterminer de façon analytique par une méthode tirée de Dogniaux (1984). C'est cette dernière approche qui est retenue dans le cadre de ce travail : de cette façon, l'adaptabilité de la méthode aux différentes régions géographiques est garantie ; elle ne dépend plus de données météorologiques nationales (éclaircissements énergétiques solaires par ciel serein, sur des surfaces horizontales et inclinées, heure par heure, pour un jour type de chaque mois de l'année) dont la disponibilité et la qualité varient selon les pays.

Ainsi, on connaît par a) les heures de masque et le masque qui leur est associé et par b) la quantité d'énergie solaire directe heure par heure. Il est donc possible de déterminer la quantité d'éclairement énergétique direct effectivement disponible en pondérant les quantités d'énergies théoriques à chaque heure de chaque mois par les masques qui leur correspondent. Les données du calcul sont le jour et l'heure de l'année, la latitude et l'altitude du lieu, le coefficient de trouble et le contenu moyen en eau de l'atmosphère caractéristiques de la région. Le résultat du calcul est l'éclairement énergétique direct disponible sur le point d'analyse. Ce calcul peut être effectué avec et sans la végétation afin de mesurer son impact sur l'éclairement direct.

2.2. Éclairement diffus et pertes par infrarouge

Nous considérons ici que l'ensoleillement diffus est isotrope, c'est-à-dire qu'il a la même intensité dans toutes les directions. En réalité, la répartition spatiale du rayonnement diffus n'est pas parfaitement isotrope : il existe un pic d'intensité énergétique diffuse dans la direction du soleil. L'erreur induite par cette hypothèse a été estimée par Laret (1981) sur base de la comparaison de 3 modèles de rayonnement. Il en déduit que, entre les 3 modèles comparés, le modèle basé sur l'hypothèse du diffus isotrope est le plus proche de la réalité. Nous avons donc adopté cette hypothèse. Il s'ensuit que la position angulaire de la portion de ciel masquée par l'arbre n'a pas d'importance, seule compte la surface de cette portion. C'est donc la valeur de l'angle solide de ciel intercepté par l'obstacle qu'il nous faut déterminer. Cet angle solide est calculé sur base d'une projection sphérique particulière, que nous avons baptisée "isoaire".

a) La projection sphérique isoaire

La projection d'une scène sphérique sur un plan de référence entraîne inévitablement des déformations : déformations angulaires (projections conformes), déformations des aires (projections équivalentes), ou les deux (projections aphyllactiques) (Donnay, 1993). La projection stéréographique ne conserve ni les angles, ni les aires, mais elle est bien adaptée au tracé manuel des parcours solaires. Elle déforme "harmonieusement" la perspective en exagérant l'importance des volumes situés près de l'horizon (voir figure 4a). La projection équidistante conserve les hauteurs angulaires après projection, mais elle déforme les aires. C'est la raison pour laquelle, nous avons développé un troisième type de projection, la projection "isoaire", qui conserve les surfaces mais déforme les angles (voir figure 4b).

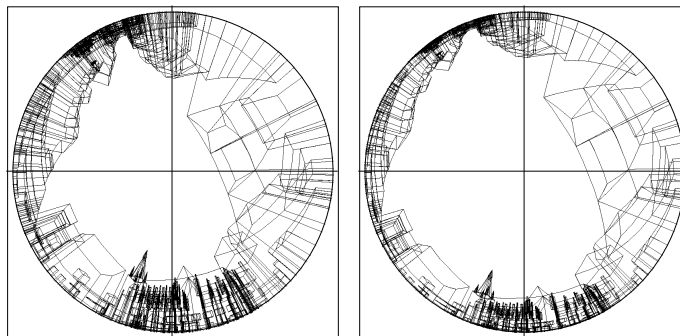


figure 4 - a) Projection stéréographique et b) projection isoaire d'une même scène

La projection isoaire consiste à appliquer une transformée $f(x,y,z)$ à tous les points de la scène, de façon à projeter celle-ci dans un cercle centré sur le point d'analyse. Les faces projetées sont planes et leur surface est directement proportionnelle à la valeur de l'angle solide qu'elles interceptent. Le cercle de référence dans lequel les faces sont projetées représente la voûte céleste. Après la projection de tous les volumes du site étudié, le cercle de référence est occupé par une série de polygones auxquels est associé un masque saisonnier.

Lorsque deux volumes de masque se superposent dans le cercle, le pourcentage de masque résultant est égal à $[100*(1-(1-\text{masque1}/100)*(1-\text{masque2}/100))]$, où masque1 et masque2 sont exprimés en pourcents. La combinaison de l'ensemble des masques de tous les volumes du site étudié fournit la valeur du masque global au point d'analyse.

b) Calcul du masque diffus

Il reste à appliquer ce masque global au rayonnement solaire radiatif en site vierge pour connaître le rayonnement diffus au point d'analyse. Le masque diffus est constant toute la journée (dans l'hypothèse du diffus isotrope). À la différence de l'éclairement direct, il est applicable à l'énergie solaire diffuse journalière sans que ce calcul nécessite une décomposition selon les différentes heures du jour. L'éclairement énergétique diffus pour une journée type de chaque mois de l'année est calculé de façon théorique à partir de données météorologiques propres au site (à savoir le rapport entre éclairement diffus par ciel serein et éclairement direct par ciel serein sur une surface horizontale) par une méthode tirée de Dogniaux (1984).

c) Pertes par infrarouge

Les pertes par infrarouge sont également considérées comme isotropes. Le masque calculé par a) s'applique donc aux pertes par infrarouge. La valeur des pertes par infrarouge est assimilée à une constante annuelle (l'émission radiative vers la voûte céleste d'une surface horizontale, par ciel serein, est de 100 W/m² en Belgique).

2.3. Rayonnement réfléchi

L'impact de la végétation sur le rayonnement réfléchi n'est pas évalué à l'heure actuelle. Ce calcul demanderait d'affecter un attribut supplémentaire aux faces de la maquette du site, à savoir un indice de réflexion du rayonnement énergétique solaire comme l'albédo. Selon Dogniaux (1984), pour les prés et pelouses, l'albédo a une valeur de 0.18 à 0.23, pour le ciment et le béton il vaut 0.55, et pour la végétation il est de 0.14 à 0.18.

Le calcul de l'ensoleillement réfléchi exigerait également de déterminer quelles sont les faces qui sont totalement ou partiellement cachées derrière d'autres faces, car seule la partie des faces qui est "visible" à partir du point d'analyse est susceptible de réfléchir le rayonnement solaire vers ce point. Cette évaluation pourrait être réalisée sur base d'une projection sphérique en "vu et caché" de l'ensembles volumes de la maquette. Un algorithme de "vu et caché" en projection sphérique a été développé au LEMA•ULg. Cet algorithme n'a pas encore été intégré au programme d'analyse énergétique, mais il s'agit là d'une piste de développement de notre méthode.

Conclusions

L'objet de ce travail était de développer une méthode d'analyse de l'impact de la végétation sur le rayonnement énergétique solaire dans le cadre d'aménagements architecturaux ou urbains. Dans ce contexte, nous avons rapidement été confrontés à deux exigences complémentaires.

1) Dans un premier temps, le concepteur doit pouvoir décrire son projet ainsi que son environnement bâti et végétal. Cette exigence a demandé un recherche préalable relative à la modélisation du milieu végétal. En effet, la végétation ne peut être représentée de la même manière qu'un volume construit traditionnel en raison de ses propriétés spécifiques (perméabilité, variabilité saisonnière du masque, ...). Nous avons donc été amenés à formaliser une représentation composite du milieu végétal afin de fournir au concepteur un outil i) suffisamment souple pour permettre la description d'un aménagement dès son avant-projet et ii) adapté à une gestion de projet susceptible de recouvrir des domaines multiples

(aspects énergétiques, spatiaux, techniques,...).

2) Ensuite, le concepteur désire évaluer son projet sur base de la maquette informatique qu'il a réalisée en 1). Nous avons donc développé une méthode de calcul de la disponibilité du rayonnement énergétique solaire en un point d'analyse. Afin de permettre des évaluations dès le stade de l'avant-projet, nous avons choisi des méthodes de calcul simples et rapides, demandant le codage du minimum de paramètres. L'ensemble de la méthode est basée sur l'utilisation de projections sphériques qui se sont révélées très efficaces pour l'analyse de l'éclairement énergétique solaire en un point d'analyse, que ce soit pour l'éclairement direct, diffus ou le rayonnement réfléchi.

Cette méthode d'analyse a doré et déjà été testée dans le cadre d'applications concrètes Leclercq et al. (1995), Dupagne et al. (1995). Ces applications, réalisées sur base d'une maquette sommaire des sites étudiés, ont démontré la faisabilité de l'un de nos objectifs initiaux, à savoir réaliser des évaluations énergétiques dès le stade de l'avant-projet architectural ou urbain.

Bibliographie

- DOGNIAUX R., 1984, "Éclairement énergétique solaire direct diffus et global des surfaces orientées et inclinées, 1^{ère} partie, Algorithmes et méthodologies", Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
- DONNAY J.-P., 1993, "Cartographie topographique", Notes de cours, Université de Liège.
- DUPAGNE A., FERNANDES E., 1995, "Urban design and environmental integration, The EXPO'98-LISBOA Experiment", Sustainable and energy efficient building, James&James.
- LARET L., 1981, "Étude de l'influence des paramètres d'isolation des bâtiments sur leur consommation de combustible. Température sans chauffage et modèles de rayonnement. Pertes par le sol - Modèles dynamiques simplifiés. Conditions climatiques extrêmes", Extrait du rapport final de la recherche IRSIA/CSTC - ULg, Laboratoire de physique du bâtiment, Université de Liège.
- LECLERCQ P., MATHUS P., 1995, "Étude énergétique de Pecs (Hongrie) - Étude de la situation existante et recommandations", Rapport intermédiaire, LEMA-UdEx, Université de Liège.
- MAILLET L., BOURGERY C., "L'arboriculture urbaine", Institut pour le développement forestier, collection Mission du paysage, Paris, 1993.
- TELLER J., 1992, "Effet de masque de la végétation", Travail de fin d'études, Université de Liège.
- VIENNOT X.G., EYROLLES G., JANSLEY N., ARQUÈS D., 1989, "Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees", Computer Graphics, vol. 23, n°3.