

Fondation Universitaire Luxembourgeoise
Arlon

**DEVELOPPEMENT ET INTEGRATION
D'OUTILS INFORMATIQUES
POUR L'AIDE A LA DECISION ENVIRONNEMENTALE**

Application à la conception architecturale

Dissertation présentée par

Philippe ANDRE

Ingénieur Civil des Constructions

pour l'obtention du grade de
Docteur en Sciences de l'Environnement

Juillet 1993

AVANT-PROPOS

Soutenue par un seul récipiendaire, une thèse doctorale ne peut toutefois se concevoir sans la coopération d'une équipe de travail.

Je tiens à remercier la Fondation Universitaire Luxembourgeoise de m'avoir donné les moyens de mener ce travail à bien.

J'exprime ma gratitude envers son Directeur, le Professeur De Backer, qui préside un jury dans lequel les deux co-directeurs, le Professeur Lebrun et le Docteur Nicolas, m'ont communiqué leur enthousiasme et leur compétence scientifique.

Que les autres membres du jury, les Professeurs de Herde et Deltour, le Docteur Morel, le Professeur Vincke, soient remerciés d'avoir accepté de lire et de juger ce travail.

Je souhaiterais également adresser à mes collègues de la cellule "Architecture et Climat" de l'Université Catholique de Louvain et à ceux du Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège la reconnaissance que leur implication dans ce travail mérite.

Je voudrais insister sur la contribution essentielle de l'atmosphère de travail régnant dans la Cellule "Energie", devenue en cours de route "Surveillance de l'Environnement", de la FUL. Tous ses membres, passés ou présents, ont apporté leur contribution à ce travail. Dès lors, merci à

Jacques, Alain, Fabrice, Hugues, Jean-François, Jean-Jacques, Jean-Luc, Michel, Michèle, Patrick, Pierre, Valérie, Vincent et Vincent.

Je n'oublie pas Jacques dont la contribution à l'instrumentation du bâtiment académique de la FUL aura été déterminante pour la suite de l'étude.

L'essentiel ne serait pas dit si je n'attribuais la qualité de la mise en forme de ce travail à ceux et celles à qui elle revient: Liliane et Catherine; Michel, Michel et Roger.

Avertissement

A l'opposé de la plupart des disciplines scientifiques, l'Environnement échappe de plus en plus à la spécialisation de ses adeptes dans la mesure où sa Science s'appuie sur les acquis de nombre de ses consoeurs.

Sans vouloir entrer dans le détour d'une échappatoire, il en va de même de cette contribution dans laquelle thermique, énergétique, mathématique, automatique, informatique, architecture et écologie cohabitent au risque de générer d'importants compromis l'une vis-à-vis de l'autre. Pour cette raison, le spécialiste de l'une ou l'autre de ces disciplines pourra s'estimer légitimement frustré par le caractère élémentaire de certains passages du texte ou par l'absence de certains développements et détails approfondis. Signalons à cet effet que la bibliographie renseigne des références qui peuvent aider à combler cette frustration.

Par ces quelques mots, je souhaiterais demander la clémence du lecteur à l'égard des manques occasionnels de rigueur qu'il découvrira dans ce travail. Je voudrais également souligner que des développements mathématiques austères et secondaires ont trouvé dans une typographie alternative une façon de figurer dans le texte sans s'imposer à la lecture des regards réticents.

Enfin, le même lecteur voudra bien accepter l'usage intensif du vocable "implémentation" qui, pour ne pas faire partie de la langue française, n'en constitue pas moins un terme communément compris dans le jargon informatique.

Le courage de commencer est la principale mise de fonds.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1. PRÉLIMINAIRES

1.1. INTRODUCTION.....	9
1.2. LE CONTEXTE DU TRAVAIL	9
1.2.1. Les projets de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).....	9
1.2.1.1. Passive Solar Commercial and Institutional Buildings (IEA Task XI).....	10
1.2.1.2. Calculation of Energy and Environmental Performance of Buildings (IEA Annex XXI)	11
1.2.2. La Cellule Energie de la FUL.....	12
1.2.3. La problématique environnementale.....	13
1.3. OBJECTIFS DE LA THÈSE.....	14
1.4. DÉMARCHE DE LA THÈSE.....	15
1.5. ETAT DE LA QUESTION	17
1.5.1. Conception Assistée par Ordinateur	18
1.5.2. Intelligence Artificielle et Systèmes Experts	18
1.5.3. Représentation synthétique et standardisée des données	19
1.5.4. Logiciels intégrés	20
1.5.5. La thèse par rapport à l'état de la question	21
1.6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	21

CHAPITRE 2. OBSERVATION

2.1. INTRODUCTION.....	25
2.2. PRÉSENTATION DU SYSTÈME MESURÉ	25
2.2.1. Description du bâtiment.....	26
2.2.2. Systèmes solaires passifs	31
2.2.3. Systèmes auxiliaires.....	31
2.3. DÉFINITION DES OBJECTIFS	32
2.4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE	32
2.5. PLAN DE MESURES ET IMPLÉMENTATION.....	36
2.5.1. Généralités	36
2.5.2. Choix des points de mesure	36
2.5.3. Choix des capteurs	40
2.5.4. Description du système d'acquisition de données.....	44
2.5.5. Traitement des données	45
2.6. PRINCIPAUX RÉSULTATS.....	46
2.6.1. Consommation d'énergie.....	46
2.6.2. Confort thermique.....	49
2.6.3. Conclusions	52
2.7. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX.....	52
2.8. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	54

CHAPITRE 3. MODÉLISATION

3.1.	INTRODUCTION.....	57
3.2.	LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLE.....	58
	3.2.1. Généralités.....	58
	3.2.2. Modèles mathématiques.....	58
	3.2.3. Modèles mathématiques en physique du bâtiment.....	59
3.3.	DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE SIMPLIFIÉ POUR LE SYSTÈME SOLAIRE PASSIF "MUR DE MASSE".....	60
	3.3.1. Introduction.....	60
	3.3.2. Description du système.....	60
	3.3.3. Les phénomènes physiques influençant le système.....	62
	3.3.4. Les paramètres du système.....	63
	3.3.5. Conditions aux limites agissant sur le système.....	65
	3.3.6. Modélisation mathématique nodale du système.....	66
	3.3.7. Utilisations du modèle développé.....	70
3.4.	DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE COMPLEXE POUR LE MUR ACCUMULATEUR DU SYSTÈME SOLAIRE PASSIF "MUR DE MASSE".....	71
	3.4.1. Introduction.....	71
	3.4.2. Hypothèses de la modélisation.....	72
	3.4.3. Développement du modèle.....	72
	3.4.4. Conditions aux limites.....	73
	3.4.5. Solution numérique.....	76
	3.4.6. Utilisation du modèle développé.....	78
3.5.	GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT.....	83
3.6.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	84

CHAPITRE 4. ANALYSE DES SYSTÈMES

4.1.	INTRODUCTION.....	87
4.2.	RAPPEL DES FONDEMENTS THÉORIQUES DE L'ANALYSE DES SYSTÈMES.....	87
	4.2.1. Généralités.....	87
	4.2.2. Représentation d'un modèle dans le cadre de la théorie des systèmes.....	90
	4.2.2.1. Le développement d'un modèle simplifié basé sur des hypothèses réalistes, directement dans le formalisme de la théorie.....	90
	4.2.2.2. La réduction d'un modèle complexe.....	91
	4.2.2.3. Modification d'un modèle existant.....	96
	4.2.3. Identification expérimentale de modèles.....	97
	4.2.4. Développement de stratégies de contrôle.....	102
4.3.	OBTENTION DE MODÈLES SIMPLIFIÉS EN THERMIQUE DU BÂTIMENT.....	104
	4.3.1. Réduction de modèles en thermique du bâtiment.....	104
	4.3.1.1. Généralités.....	104

	4.3.1.2.	Réduction du modèle simplifié du mur de masse.....	105
4.3.2.		Développement des modèles simplifiés en thermique du bâtiment.....	106
	4.3.2.1.	Généralités.....	106
	4.3.2.2.	Développement d'un modèle simplifié pour un bâtiment multizone	107
4.4.		IDENTIFICATION DE SYSTÈMES EN THERMIQUE DU BÂTIMENT.....	110
	4.4.1.	Introduction.....	110
	4.4.2.	Le logiciel d'identification "idsoft".....	111
	4.4.3.	Collecte de données.....	111
	4.4.4.	Identification des paramètres du modèle du mur de masse	112
	4.4.4.1.	Identification de la diffusivité thermique du matériau constituant la paroi accumulatrice (noeud n° 6).....	113
	4.4.4.2.	Identification du coefficient de convection à la surface du mur de masse, côté serre (noeud n° 4).....	115
	4.4.5.	Identification de paramètres globaux du bâtiment.....	116
	4.4.6.	Synthèse des résultats.....	119
	4.4.7.	Identification sur modèle d'état par application du Filtre de Kalman.....	120
4.5.		APPLICATION DE LA THÉORIE DE LA COMMANDE OPTIMALE À LA THERMIQUE DU BÂTIMENT.....	123
	4.5.1.	Introduction.....	123
	4.5.2.	Application de la méthode à un local (grand auditoire) du bâtiment académique de la ful.....	124
	4.5.3.	Conclusions sur l'application de la commande optimale	130
4.6.		PERSPECTIVES GÉNÉRÉES PAR LA THÉORIE DES SYSTÈMES ADAPTATIFS	131
4.7.		GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT.....	132
	4.7.1.	Introduction.....	132
	4.7.2.	Quelques exemples.....	133
	4.7.3.	Spécificités des problèmes environnementaux.....	136
	4.7.3.1.	Taille des systèmes.....	136
	4.7.3.2.	Linéarité.....	136
	4.7.3.3.	Agrégation de modèles	138
	4.7.3.4.	Contrôle.....	138
	4.7.3.5.	Sensibilité et stabilité.....	139
4.8.		CONCLUSIONS DU CHAPITRE	140
4.9.		ANNEXES DU CHAPITRE 4.....	142
	4.9.1.	Signification physique des coefficients du modèle (4.34).....	142
	4.9.2.	Relation entre les coefficients du modèle (4.54) et ceux du modèle (4.50).....	145
	4.9.3.	Relation entre les coefficients du modèle (4.55) et ceux du modèle (4.54).....	146
	4.9.4.	Relation entre les paramètres du modèle (4.56) et les coefficients d'échanges physiques	148

CHAPITRE 5. SIMULATION

5.1.	INTRODUCTION.....	151
------	-------------------	-----

5.2.	LES OUTILS DE SIMULATION DISPONIBLES EN THERMIQUE DU BÂTIMENT	151
5.2.1.	Généralités	151
5.2.2.	Logiciels de simulation en thermique du bâtiment.....	153
5.2.2.1.	Classification	153
5.2.2.2.	Présentation de quelques logiciels	155
5.2.2.3.	Synthèse	157
5.3.	VALIDATION DU LOGICIEL MBDSA	158
5.3.1.	Démarche de validation	158
5.3.2.	Choix du logiciel.....	160
5.3.3.	Mise en oeuvre de la validation de mbdsa.....	161
5.3.3.1.	Présentation des périodes de validation.....	161
5.3.3.2.	Description du bâtiment	163
5.3.3.3.	Résultats pour la période hivernale	164
5.3.3.4.	Résultats pour la période estivale	166
5.3.3.5.	Conclusions.....	168
5.4.	CALIBRATION DU LOGICIEL MBDSA	168
5.4.1.	Démarche de calibration	168
5.4.2.	Mise en oeuvre de la calibration de mbdsa.....	169
5.5.	UTILISATION DU LOGICIEL MBDSA.....	171
5.5.1.	Introduction	171
5.5.2.	Prédiction du comportement du bâtiment académique de la FUL	171
5.5.3.	Analyse paramétrique ou étude de sensibilité du bâtiment académique de la FUL	174
5.5.3.1.	Démarche d'analyse paramétrique	174
5.5.3.2.	Mise en oeuvre.....	174
5.5.3.3.	Résultats.....	177
5.5.3.4.	Optimisation.....	189
5.5.4.	Simulation de situations non-mesurables	190
5.5.5.	Emulation	191
5.6.	EXTENSIONS DU LOGICIEL TRNSYS.....	194
5.6.1.	Introduction.....	194
5.6.2.	Modèle du mur de masse	194
5.6.3.	Modèle du contrôleur optimal.....	196
5.6.4.	Modèle du Filtre de Kalman	197
5.6.5.	Modèle du prédicteur de perturbation.....	199
5.6.6.	Modèle du générateur de consigne.....	200
5.7.	GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX	202
5.8.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	202

CHAPITRE 6. BASES DE DONNÉES

6.1.	INTRODUCTION.....	207
6.2.	FONDEMENT DE LA THÉORIE DES BASES DE DONNÉES	208
6.2.1.	Introduction.....	208
6.2.2.	Organisation de la base de données	209

6.2.3.	Schéma de la base des données.....	212
6.2.4.	Implémentation de la base de données	213
6.2.5.	Utilisation de la base de données.....	213
6.2.6.	Problèmes particuliers	214
6.3.	DÉVELOPPEMENT D'UNE BASE DE DONNÉES POUR LES CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.....	214
6.3.1.	Motivation.....	214
6.3.2.	Développement de la base de données.....	215
6.3.3.	Implémentation et développement du logiciel de gestion.....	216
6.3.4.	Utilisation de la base de données bmw	217
6.3.4.1.	Consultation des propriétés d'un matériau	218
6.3.4.2.	Recherche d'un enregistrement à partir de la valeur d'un ou plusieurs de ses champs	221
6.3.4.3.	Calcul du coefficient K.....	221
6.3.5.	Problèmes particuliers	222
6.4.	GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX	222
6.5.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	224

CHAPITRE 7. SYSTÈMES EXPERTS

7.1.	INTRODUCTION.....	227
7.2.	RAPPELS DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES EXPERTS	228
7.2.1.	Introduction.....	228
7.2.2.	Moteur d'inférence et base de connaissances.....	229
7.2.3.	Méthodologie du développement des systèmes experts.....	230
7.2.4.	Implémentation des systèmes experts.....	231
7.3.	DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES EXPERTS EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT.....	232
7.3.1.	Introduction.....	232
7.3.2.	Isolde, un outil d'aide à la conception solaire de bâtiments	233
7.3.3.	mis, un outil d'aide à la classification et à la documentation de modèles mathématiques en physique du bâtiment	235
7.3.4.	Heating expert, un logiciel de contrôle en temps réel des bâtiments solaires.....	238
7.4.	GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX	240
7.5.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	242

CHAPITRE 8. INFOGRAPHIE

8.1.	INTRODUCTION.....	245
------	-------------------	-----

8.2.	INFOGRAPHIE ET BÂTIMENT : CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR	246
8.2.1.	Généralités	246
8.2.2.	Evolution de la Conception Assistée par ordinateur	246
8.2.3.	Un exemple de système : Autocad	250
8.3.	INFOGRAPHIE ET ENVIRONNEMENT : SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE.....	251
8.3.1.	Généralités	251
8.3.2.	Evolution des Systèmes d'Information Géographique	253
8.3.3.	Application des Systèmes d'Information Géographique.....	256
8.3.4.	Un exemple de système : le logiciel Arc/Info	256
8.4.	CONCLUSION DU CHAPITRE	258

CHAPITRE 9. INTÉGRATION

9.1.	INTRODUCTION.....	263
9.2.	LES CONTRAINTES À SATISFAIRE PAR L'INTÉGRATION DES RESSOURCES.....	264
9.2.1.	Spécifications relatives à l'architecture du logiciel	264
9.2.2.	Spécifications relatives aux logiciels à intégrer.....	265
9.3.	MISE EN OEUVRE DE L'INTÉGRATION POUR UN PROBLÈME DE CONCEPTION DE BÂTIMENTS.....	267
9.3.1.	Méthodes d'intégration.....	267
9.3.1.1.	Couplage "Base de données - logiciel de simulation"	267
9.3.1.2.	Introduction des systèmes experts.....	269
9.3.1.3.	Introduction des ressources de la cao.....	271
9.3.2.	Choix et développement de la structure centrale	272
9.3.2.1.	Choix du formalisme.....	272
9.3.2.2.	Choix du langage.....	274
9.3.2.3.	Développement de la structure	274
9.3.3.	Développement des modules d'interface	278
9.3.3.1.	Généralités.....	278
9.3.3.2.	Interface pour la cao.....	280
9.3.3.3.	Interface pour la simulation.....	285
9.3.3.4.	Interface pour le système de gestion de base de données.....	288
9.3.3.5.	Interface pour le système expert	290
9.3.3.6.	Synthèse	291
9.3.4.	Développement du module d'arbitrage	292
9.3.4.1.	Généralités.....	292
9.3.4.2.	Fondements de l'analyse multicritère.....	292
9.3.4.3.	Implémentation	294
9.3.5.	Développement de l'interface-utilisateur.....	296
9.3.6.	Développement d'une procédure de co-résidence de logiciels.....	297
9.3.7.	Synthèse : le logiciel idifix	299

9.4.	UTILISATION DE IDEFIX POUR UN PROBLÈME DE CONCEPTION DE BÂTIMENTS.....	303
9.4.1.	Préambule.....	303
9.4.2.	Accès au système.....	303
9.4.3.	Configuration du logiciel.....	304
9.4.4.	Définition du projet.....	304
9.4.5.	Session de conception (cao).....	304
9.4.6.	Session "bases de données".....	307
9.4.7.	Session "Simulation".....	307
9.4.8.	Session "Gestion du projet".....	311
9.4.9.	Session "Expertise".....	311
9.4.10.	Session d'évaluation.....	315
9.4.11.	Synthèse et perspectives de développement.....	316
9.5.	GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX.....	317
9.5.1.	Définition et position de idefix.....	317
9.5.2.	Le rôle des DSS dans la gestion de l'environnement.....	319
9.5.3.	Quelques exemples de DSS.....	320
9.5.4.	Idefix comme générateur de DSS.....	322
9.6.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE.....	324

CHAPITRE 10. APPLICATIONS

10.1.	INTRODUCTION.....	327
10.2.	ANALYSE DES NUISANCES ENVIRONNEMENTALES.....	327
10.2.1.	Introduction.....	327
10.2.2.	Analyse des ressources informatiques disponibles pour l'analyse des nuisances.....	328
10.2.3.	Intégration des ressources.....	329
10.2.4.	Spécifications d'un prototype.....	337
10.2.5.	Utilisation du prototype.....	340
10.3.	GESTION D'UNE STATION D'ÉPURATION.....	342
10.3.1.	Introduction.....	342
10.3.2.	Analyse des ressources informatiques disponibles.....	342
10.3.3.	Intégration des ressources.....	343
10.3.4.	Spécifications d'un prototype.....	345
10.4.	CONSÉQUENCES DE LA GÉNÉRALISATION.....	346
10.5.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE.....	348

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	349
----------------------------	-----

NOMENCLATURE.....	353
-------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE.....	359
--------------------	-----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Environnement et Informatique : deux néologismes pour une même réalité. Deux produits de la fin du 20^{ème} siècle qui expriment la mutation des préoccupations du génie humain et une illustration du bouleversement technologique qui l'a, sans aucun doute, déclenchée. A l'aube de l'an 2000, les décideurs de la planète se trouvent confrontés à la plus exigeante de leurs réflexions. L'environnement se dégrade, résultat de l'explosion technologique issue de la Révolution Industrielle. La capacité de production de l'être humain a dépassé les limites du soutenable et l'environnement, agressé à de multiples points de vue, réagit, parfois brusquement. Son inertie ne suffit plus. Ses capacités d'adaptation, que l'on a jugées un peu audacieusement immenses donc infinies, saturent et des décharges naissent ça et là, exprimant le trop plein de doléances ressenti par la Nature. Face à ce problème général, l'homme se mobilise ou est mobilisé, parfois manipulé par de sourdes tractations qui sous-tendent toujours les processus de décision statuant, au plus haut niveau, sur les options essentielles du développement et du devenir.

Cette mobilisation se traduit par une mutation des programmes politiques qui engendre une répercussion directe sur de nombreuses activités de l'être humain. Ainsi, la société industrielle se voit contrainte de revoir ses stratégies et ses méthodes de façon à diminuer l'agression qu'elle réalise contre son environnement. Sous la pression d'incitants financiers ou dans la crainte de répressions taxatoires, à moins que cela ne soit sur le coup d'une audacieuse politique d'innovation, la première entreprise maîtrisant un processus apparaissant la mieux placée pour créer la norme, les industriels stimulent le développement et l'innovation technologiques afin de traduire, à court terme, les progrès environnementaux dans des réalités économiques.

Sous-tendant, peut-être de façon trop épisodique et trop fragile, le dynamisme orienté vers le progrès de l'industrie, le milieu de la recherche scientifique reçoit de la part des décideurs, la même mission de redéfinition de ses objectifs majeurs en relation avec les risques du même nom. Dans la plupart des pays industrialisés, les programmes liés à l'environnement voient leurs moyens se renforcer. Les scientifiques l'ont bien compris, qui réorientent leurs recherches dans des créneaux plus porteurs et suivant des axes plus dirigés vers les préoccupations des bailleurs de fonds. Se posant un peu en précurseur de cette mutation des priorités, la recherche en matière de Gestion Rationnelle de l'Energie a rebondi suite aux conséquences néfastes de la désormais fameuse crise pétrolière des années septante. Celle-ci a même généré la création d'un organisme, l'Agence Internationale de l'Energie, spécialement dédié à la coordination de vastes programmes de recherche en cette matière. La philosophie ayant présidé à cet avènement semble se répéter dans le domaine, plus vaste, de l'Environnement duquel il est d'ailleurs permis de ne pas exclure la Gestion de l'Energie, considéré alors comme l'un des flux caractérisant le système dans sa globalité. Concrètement, cette nouvelle réalité se traduit par la sollicitation des scientifiques de la part des décideurs afin de leur fournir les outils et méthodes spécifiquement dédiés à l'approche environnementale.

Parmi ces outils, les moyens informatiques s'imposent à tous les scientifiques préoccupés d'environnement par leur caractère indispensable ou "incontournable". En parallèle avec la conscientisation croissante aux défis environnementaux, la dernière décennie a en effet, sans aucune contestation possible, instauré la nécessité d'utiliser les potentialités de la discipline informatique afin d'aborder, de poser et de résoudre les problèmes apparaissant dans une gamme extrêmement large d'activités humaines. En mutation perpétuelle, l'industrie du matériel et du logiciel propose sans cesse de nouveaux produits, plus puissants, plus performants, plus rapides, plus conviviaux, mieux adaptés aux nécessités de l'utilisateur. L'association de cette évolution à celle de la conscience de l'environnement engendre des conséquences spécifiques. Les problèmes environnementaux se distinguent en effet de tous ceux qui ont jusqu'à présent sollicité les moyens de l'ordinateur par leur caractère complexe et pluridisciplinaire : l'environnement, plus qu'une discipline propre, constitue un contexte dans lequel interagissent une multitude de disciplines, chacune exerçant sur le problème la pression de sa spécificité.

De cette réalité naît le besoin d'une nouvelle approche, une approche qui ne se caractérise pas nécessairement par le développement de ressources nouvelles, mais par une association harmonieuse de moyens existant et disponibles. En langage informatique, l'harmonisation nécessaire à l'efficacité du système résultant se traduit par le concept d'intégration. Cette opération consiste en effet à permettre le dialogue, la communication, la coopération entre différents acteurs logiciels, voire matériels, en vue de la résolution d'un problème unique requérant l'utilisation de l'outil informatique.

Cette thèse se situe en plein coeur de cette problématique. Son objectif est de proposer une méthodologie d'intégration de ressources informatiques afin d'aboutir à l'obtention d'un logiciel intégré utilisable pour l'analyse et la résolution de divers problèmes d'environnement. Pour ce faire, la démarche procède, de façon globale, en deux étapes.

Tout d'abord, la thèse réalise une analyse individuelle des ressources potentiellement constitutives du système intégré. Dans cette optique, quatre catégories de logiciels subissent un examen approfondi : les logiciels de simulation numérique, les systèmes de gestion de bases de données, les logiciels à vocation graphique (Conception Assistée par Ordinateur, Systèmes d'Informations Géographiques), les systèmes experts. La première catégorie citée, à savoir les logiciels de simulation, reçoit même une attention particulière dans la mesure où ils font appel à deux disciplines fondamentales du domaine scientifique, l'observation, voire l'expérimentation, et la modélisation mathématique. Par conséquent, la validité d'une approche utilisant de tels logiciels implique la nécessité de s'intéresser aux concepts fondamentaux que représentent, de façon étroitement liée, l'obtention d'informations pertinentes et le développement de modèles fiables. Ces deux disciplines trouvent même un intermédiaire puissant dans la théorie des systèmes, leur permettant d'harmoniser leur acquis respectifs et de les transférer dans la démarche de simulation. Ces considérations et ces interactions apparaissent à la base de quatre chapitres (2 à 5) qui, à la suite de quelques informations préliminaires, effectuent la présentation du premier acteur du logiciel intégré.

Dans la foulée, les trois autres types de ressources subissent une analyse, de nature toutefois moins approfondie que celle qui a prévalu pour les programmes de simulation (chapitres 6, 7 et 8).

Pour des raisons historiques qui sont expliquées dans le chapitre préliminaire, l'utilisation des différents acteurs informatiques se voit concrétisée sur un problème environnemental bien précis, celui de la conception de bâtiments avec une attention particulière prêtée aux performances énergétiques. La présentation de chacun des acteurs du logiciel intégré se déroule dès lors de façon identique : rappel succinct des fondements théoriques sous-jacents, développement et illustration dans le domaine de la conception environnementale de bâtiments, généralisation à d'autres problèmes environnementaux.

La seconde partie de la thèse aborde spécifiquement le problème de l'intégration des ressources présentées dans les chapitres précédents. Dans ce cadre, la thèse propose une méthodologie spécifique fondée sur la définition d'une structure neutre par laquelle transitent toutes les informations véhiculées par le système (Structure d'Echange de Données). Ce développement utilise les richesses et la puissance de la Programmation Orientée Objet. Ensuite, les différents intervenants du système se voient greffés sur la structure par l'intermédiaire d'un module d'interfaçage spécifique conçu de façon à réduire le risque de rejet. La confrontation de différents acteurs, chacun nanti de leur point de vue, induit le risque de l'émergence de conflits. Pour cette raison, le système est pourvu de procédures adaptées, fondées sur l'analyse multicritère, qui permettent de gérer les arbitrages et d'évacuer les conflits. Enfin, l'ensemble des ressources est coulé dans le moule d'une interface utilisateurs conférant au système convivialité et transparence.

Tous ces développements débouchent sur la proposition d'un prototype qui pour la circonstance a reçu le nom d'IDEFIX, acronyme de "Intelligent Decision-making in Environment Featuring the Integration of CROSS resources". Pour les mêmes raisons que celles évoquées ci-dessus, ce prototype se voit dans un premier temps appliqué à la problématique de la conception de bâtiments. Il en résulte une présentation des potentialités offertes par ce type d'outil pour les décideurs en matière de conception architecturale, à savoir les architectes et bureaux d'études spécialisés.

Pour conclure, et dans le même esprit que celui qui a présidé à la réalisation du travail, le dernier chapitre propose l'application de la démarche d'intégration de ressources à deux autres problèmes spécifiquement environnementaux : celui de l'analyse de la dispersion de polluants et celui de la gestion automatisée d'une station d'épuration. Ces deux exemples étendent l'applicabilité de la méthodologie dans deux directions différentes et démontrent la validité de l'approche. De plus, ils génèrent des conséquences qui ont des retombées importantes sur les caractéristiques du système et confirment le bien-fondé de l'utilisation de la Programmation Orientée Objet, dernière née d'une évolution qui a le mérite de rapprocher un peu plus les points de vue de l'informatique et de l'environnement.

CHAPITRE 1.

PRÉLIMINAIRES

1.1. INTRODUCTION

Avant la présentation proprement dite du travail, il apparaît important d'en jeter les bases. Ceci consiste, dans notre cas, à définir le contexte, en particulier contractuel, dans lequel la tâche s'est déroulée, à cerner les objectifs spécifiques de la thèse et à proposer une démarche scientifique cohérente et rigoureuse permettant d'aboutir à la réalisation de ces objectifs. Enfin, un état de la question dans le domaine du développement de logiciels intégrés sera proposé, afin de situer ce travail dans le cadre de l'évolution actuelle de la recherche scientifique.

1.2. LE CONTEXTE DU TRAVAIL

Ce travail s'est déroulé dans le contexte général des activités de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise, en particulier les projets de la cellule "Energie" devenue en cours de route "Surveillance de l'Environnement" et les contrats couvrant des participations à différents projets de l'Agence Internationale de l'Energie.

1.2.1. Les projets de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

Une bonne partie des travaux relatés dans ce texte ont été réalisés en relation avec la participation de la FUL à deux projets organisés sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).

L'Agence Internationale de l'Energie (Michiels, 1992) est un organisme autonome créé en 1974 dans le cadre de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) pour élaborer un programme international d'énergie. Elle met en oeuvre un programme étendu de collaboration sur le plan de l'énergie entre 23 des 24 pays membres de l'OCDE auxquels il faut ajouter la Commission des Communautés Européennes. Sa structure est très complexe et couvre 4 domaines de recherche ("Working Parties") liés à l'énergie :

- les combustibles fossiles ("Fossil Fuels")
- les énergies renouvelables ("Renewable Energies")
- les technologies pour l'utilisation finale ("End-Use Technologies")
- la fusion nucléaire ("Nuclear Fusion").

Dans chacun de ces domaines, un certain nombre de programmes sont organisés ("Implementing Agreements") et gérés par un comité exécutif ("Executive Committee"). Chaque programme met régulièrement en oeuvre de nouveaux projets de recherche qui, suivant le cas, portent le nom d'Annexes ("Annexes") ou de Tâches ("Tasks").

Au cours des cinq dernières années écoulées (1987-1992), la FUL a participé à deux projets spécifiques :

- un projet organisé dans le cadre du programme "Solar Heating and Cooling" du domaine "Renewable Energies", en l'occurrence la tâche XI : "Passive Solar Commercial and Institutional Buildings"
- un projet organisé dans le cadre du programme "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" du domaine "End-Use Technologies", en l'occurrence l'Annexe XXI : "Calculation of Energy and Environmental Performances of Buildings".

1.2.1.1. Passive Solar Commercial and Institutional Buildings (IEA Task XI)

Ce projet a démarré officiellement le 1er juillet 1986. Ses objectifs affirmés (Hastings, 1986) étaient d'accélérer le développement et l'application de systèmes solaires innovateurs passifs et hybrides pour les bâtiments commerciaux et institutionnels en procurant :

- a) des études de cas de base ("Basic Case Studies") et des études de cas avancés ("Advanced Case Studies") de projets construits dans les pays participants (sous-tâche "A")
- b) des études de sensibilité des paramètres-clés de la conception de bâtiments, des améliorations aux modèles de simulation et des tests d'outils de conception (sous-tâche "B")
- c) des directives de conception pour l'intégration de systèmes solaires passifs et hybrides dans les bâtiments commerciaux (sous-tâche "C").

Au niveau belge, la participation a officiellement débuté le 15 décembre 1986 par une collaboration de l'Université Catholique de Louvain, département "Architecture et Climat" (Prof. A. De Herde) et de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise, cellule "Energie" (J. Nicolas). Le financement de cette participation a été assuré par le Ministère des Affaires Economiques (du 15/12/86 au 30/06/90) et ensuite par le Ministère de la Région Wallonne (du 01/07/90 au 30/09/91). Le support expérimental de la participation à ce projet était constitué par l'Ecole Primaire de Tournai pour l'UCL et par le bâtiment académique de la FUL pour la FUL. Les chapitres 2 à 5 de cette thèse s'articulent autour de nombreux développements et résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

1.2.1.2. Calculation of Energy and Environmental Performance of Buildings (IEA Annex XXI)

Ce projet a démarré officiellement le 1er octobre 1989. Ses objectifs affirmés (Bloomfield, 1989) étaient de :

- développer des procédures de certification de qualité pour le calcul de la performance énergétique et environnementale des bâtiments en procurant de l'assistance sur :
 - les hypothèses de la modélisation et des programmes
 - l'utilisation appropriée de méthodes de calcul pour un certain domaine d'applications de conception
 - l'évaluation des méthodes de calcul
- établir les besoins du marché en ce qui concerne les procédures de calcul dans le domaine de la conception des bâtiments
- proposer des directions stratégiques pour le développement de procédures de calcul
- proposer des moyens pour effectuer le transfert de technologie des procédures de calcul vers les milieux professionnels de la conception de bâtiments.

Au niveau belge, la participation a officiellement débuté le 1er décembre 1989 et était coordonnée par l'Université de Liège, Laboratoire de Thermodynamique (Prof. J. Lebrun). Dans ce cadre-là, la FUL s'est vue confier une mission de sous-traitance couvrant essentiellement la participation à la sous-tâche "A" : "Documentation de modèles". La participation à ce projet a été supportée financièrement par le Ministère de la Région Wallonne, du 01/12/89 au 30/11/92. Quelques résultats issus de la participation à ce projet sont repris au chapitre 5 (Simulation) et au chapitre 7 (Systèmes Experts).

1.2.2. La Cellule Energie de la FUL

La construction et l'occupation de bâtiments solaires (actifs et passifs) ont justifié la création d'une cellule "Energie" à la Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Au fil des années, le travail de cette cellule a évolué vers la problématique du stockage thermique de l'énergie, essentiellement dans des applications de type "bâtiment". C'est en plein coeur de cette activité que la participation au projet IEA Task XI (1.2.1.1.) a été engagée. Toutefois, les années qui ont suivi ont vu une redéfinition partielle des objectifs et activités de cette cellule, principalement imputable au contexte socio-économique en vigueur (fin de la crise pétrolière et baisse des coûts associés) qui a entraîné une modification des affectations budgétaires de la recherche scientifique. Cela s'est traduit par un intérêt de plus en plus affirmé pour la problématique de l'environnement. Dans cette optique, la cellule "Energie" a choisi de diriger ses acquis et son expérience dans le domaine de la mesure vers la "Surveillance de l'Environnement". Cette discipline apparaît comme constituée de 3 étapes distinctes et successives :

- le capteur et l'acquisition des données
- le traitement des données
- l'aide à la décision qui en résulte.

Le travail décrit dans cette thèse a été réalisé pendant cette période de mutation et a été largement influencé par les nouvelles impulsions données à la cellule. En particulier, il se situe au niveau de la 3^{ème} étape (aide à la décision) du projet "Surveillance de l'Environnement". Il s'inscrit par conséquent dans un souci de cohérence maximale par rapport aux objectifs généraux, passés, présents et futurs, de cette cellule et répond, de plus, à un besoin urgent issu des nouvelles données et résultant d'une conscientisation toujours plus grande aux problèmes environnementaux.

Cette adaptation du contenu de la thèse à la mutation des préoccupations de la Cellule "Energie" de la FUL apparaît d'autant plus aisée que, dans ce travail, l'énergétique et la conception des bâtiments sont considérés comme des problèmes environnementaux: l'utilisation rationnelle de l'énergie, en particulier le recours aux énergies renouvelables, constitue une stratégie d'harmonisation des environnements extérieur et intérieur des bâtiments et contribue de manière non négligeable au développement durable de la planète par l'économie des réserves énergétiques disponibles et la réduction des rejets nocifs (CO₂) à destination de l'environnement. Par conséquent, l'énergétique des bâtiments constitue un contexte exemplatif adéquat pour servir de support au travail présenté.

1.2.3. La problématique environnementale

Les années 80 ont vu en effet une évolution radicale des préoccupations techniques et humaines, par une part de plus en plus grande attribuée à la composante environnementale des mécanismes de prise de décision. Le milieu de la recherche scientifique n'a évidemment pas échappé à la règle et des crédits de plus en plus importants sont octroyés, de par le monde, dans ce domaine.

Plus qu'un problème en soi, l'environnement apparaît de plus en plus comme un contexte dans lequel les problèmes techniques et humains doivent se résoudre. Ce contexte possède des caractéristiques propres qui se reflètent sur tous les problèmes qui y sont abordés :

- une caractéristique pluridisciplinaire qui résulte du contexte lui-même en ce que les problèmes sont analysés dans leur ensemble et non plus suivant une facette unique et bien déterminée; cette caractéristique augmente fortement la complexité des problèmes de par la participation de disciplines extrêmement différentes.
- une caractéristique "multicritère" qui en découle et exprime la dépendance de la solution du problème vis-à-vis de tous les acteurs qui y prennent part. Dans cette optique, la solution d'un problème environnemental n'apparaît en aucun cas comme unique ni optimale mais se présente plutôt sous la forme d'un consensus qui satisfait, à moindre mal, toutes les parties prenantes du problème.

Ces deux caractéristiques se doivent d'engendrer des conséquences dans le choix des outils et des moyens mis en oeuvre pour résoudre un problème dans un contexte environnemental. En d'autres termes, l'intégration que requiert la prise en main d'un problème de ce type doit se retrouver dans les outils, en particulier l'outil informatique, utilisé pour aborder le problème. Il en résulte une plus grande efficacité de l'outil, par une meilleure adéquation à l'objectif poursuivi et une plus grande confiance dans la validité de ses apports.

Cette thèse sera en effet consacrée à l'étude de l'outil informatique. Les années 80 ont en effet, outre la conscience de l'environnement, définitivement instauré l'utilisation intensive de l'ordinateur dans la résolution d'un nombre croissant de problèmes. Il en résulte un usage désordonné, parfois abusif, de l'outil dont s'affublent les partisans aveugles et qui génèrent scepticisme et incrédulité, parfois justifiés d'ailleurs, chez les réfractaires à son utilisation.

1.3. OBJECTIFS DE LA THÈSE (ANDRÉ, 1992A)

La nature pluridisciplinaire des phénomènes environnementaux et les critères, multiples, auxquels il est demandé à la solution de satisfaire ont comme conséquence que l'utilisation d'un outil informatique isolé ne peut répondre que de façon partielle à la question posée. Par exemple, l'utilisation de modèles de simulation numérique peut conduire à des solutions discutables si certaines données ou résultats ne sont pas corroborés par les enseignements du terrain. Dans un autre ordre d'idées, l'introduction des données dans un modèle de simulation numérique est grandement facilitée par l'utilisation d'un interface graphique. Enfin, quel crédit apporter aux résultats issus de l'ordinateur si la solution proposée va à l'encontre des normes en vigueur ou de la disponibilité sur le marché ou encore de l'enveloppe budgétaire allouée au projet?

L'objet essentiel de la thèse est de montrer que, pour résoudre un problème environnemental ou, à tout le moins, pour apporter une contribution à la solution basée sur les moyens informatiques, il convient de disposer de différentes ressources complémentaires et d'en réaliser l'intégration. Cette démarche apparaît d'autant plus naturelle que l'intégration des ressources mises en oeuvre pour participer à la solution ne constitue rien d'autre que la traduction informatique du problème environnemental, de sa complexité et de sa pluridisciplinarité.

Les ressources informatiques utilisables dans le cadre d'un problème d'environnement et considérées dans ce travail ressortent des disciplines suivantes :

- l'expérimentation
- la modélisation
- l'analyse des systèmes
- la simulation
- le stockage et les manipulations de l'information
- l'infographie
- l'intelligence artificielle, en particulier les systèmes experts
- l'analyse multicritère
- les logiciels intégrés.

Toutes ces disciplines constituent une facette de l'utilisation de l'outil informatique en vue de résoudre un problème environnemental. Elles correspondent également aux différentes sources d'informations qui peuvent véhiculer dans un système environnemental.

1.4. DÉMARCHE DE LA THÈSE (ANDRÉ, 1992A)

Tout au long de la thèse, l'objectif général décrit ci-dessus sera poursuivi dans un domaine particulier qui est celui de la conception des bâtiments et plus particulièrement de l'habitat solaire passif. La raison d'être de ce champ d'applications particulier réside dans l'expérience accumulée par la participation aux projets de l'AIE décrits en 1.2.1.

La démarche de la thèse consistera à :

1. Décrire les différentes disciplines en les illustrant dans le domaine de la conception des bâtiments et plus particulièrement de l'habitat solaire passif :
 - l'observation (la mesure) des systèmes environnementaux (chapitre 2)
 - la modélisation mathématique des systèmes environnementaux (chapitre 3)
 - l'application de l'analyse des systèmes aux systèmes environnementaux, en particulier le développement de modèles d'état, l'identification de systèmes et la synthèse de stratégies de contrôle optimal (chapitre 4)
 - la simulation numérique des systèmes environnementaux (chapitre 5) qui utilisera les acquis des chapitres 2 et 3 par l'intermédiaire des techniques développées au chapitre 4
 - le stockage et la manipulation de données relatives à certains systèmes environnementaux (chapitre 6)
 - l'application de méthodes de l'Intelligence Artificielle, et plus particulièrement de la technologie des Systèmes Experts, aux problèmes environnementaux (chapitre 7)
 - l'application de techniques d'infographie en vue de parvenir à la représentation graphique informatisée de certains problèmes environnementaux (chapitre 8)
2. Associer et mettre en communication les différentes ressources au sein d'un prototype de logiciel intégré (chapitre 9, première partie)
3. Tester et appliquer le logiciel intégré dans le domaine de la conception thermique des bâtiments (chapitre 9, deuxième partie)
4. Définir les critères et illustrer la généralisation du système à d'autres domaines environnementaux (chapitre 10), en particulier l'analyse spatiale de la dispersion de polluants, la gestion d'une station d'épuration.

Cette démarche est illustrée par la structure suivante (fig. 1.1) qui montre l'interdépendance entre les différents chapitres. La structure de la thèse correspond à celle du logiciel intégré lui-même. Elle traduit la complexité, la pluridisciplinarité d'un problème situé dans le contexte environnemental et les conséquences engendrées au niveau des outils, en particulier l'outil informatique, mis en oeuvre pour développer une solution. Enfin, la structure proposée se veut être un moule dans lequel se couleront toute une gamme de problèmes. Les aspects évolutif et adaptatif devront dès lors être soignés afin d'assurer la portabilité du produit développé.

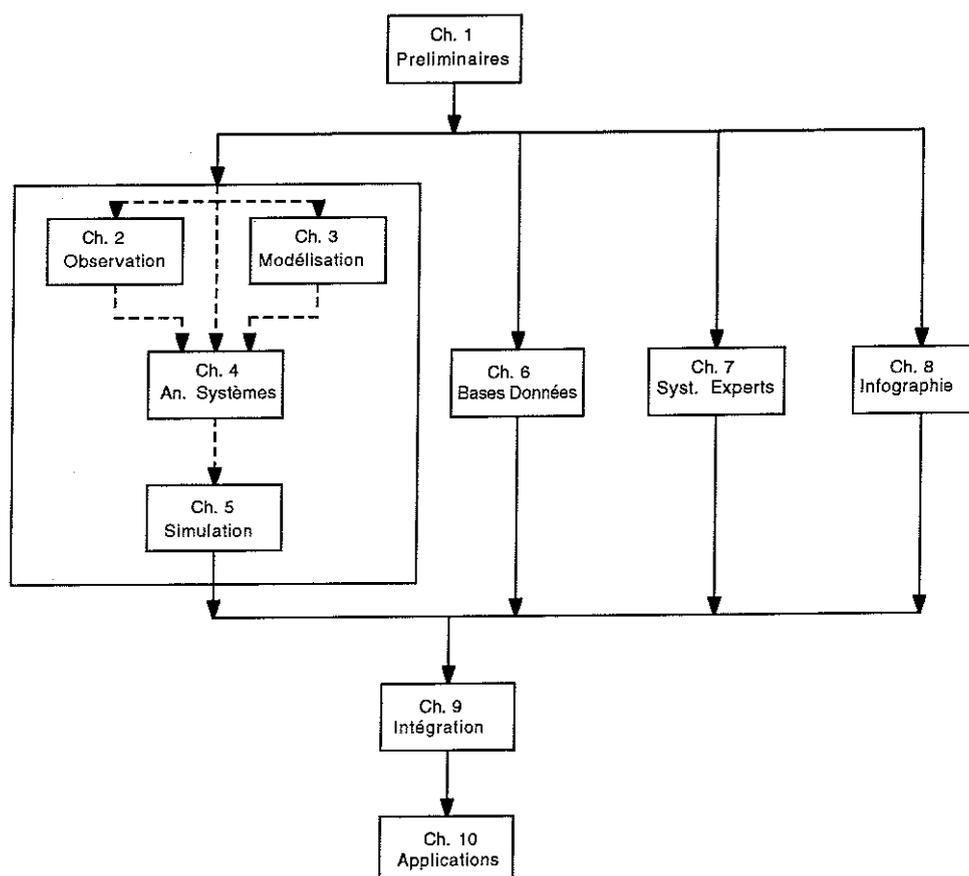


Fig. 1.1. Structure de la thèse et interdépendance des chapitres.

1.5. ETAT DE LA QUESTION

Le développement de logiciels intégrés, en particulier dans le domaine du bâtiment, constitue un domaine en pleine expansion. La raison d'être de cet essor réside d'abord dans le caractère pluridisciplinaire du processus de conception et de construction de bâtiments. En effet, le fait de construire une habitation, un ouvrage d'art, une voirie, un barrage à un endroit donné constitue un problème environnemental dans le sens où il doit être considéré dans un contexte global prenant en compte les différents aspects de l'environnement : l'ouvrage construit affecte un site, interagit avec la géologie, la topographie, les caractéristiques mécaniques du sol. Il fait appel à différentes techniques et implique divers milieux professionnels : architecture, stabilité, chauffage et conditionnement d'air, éclairage, assainissement, isolation thermique et acoustique. Enfin, il n'est pas sans occasionner des conséquences au niveau socio-économique et se doit de satisfaire des contraintes légales (réglementation de l'urbanisme par exemple) ou réglementaires (niveau d'isolation minimum).

Une autre raison, d'origine diamétralement opposée à la première, du développement de logiciels intégrés provient du contexte informatique lui-même. L'avènement de l'outil informatique, spécialement renforcé depuis l'introduction de systèmes abordables pour les indépendants et les PME a touché tous les milieux professionnels. Une multitude de logiciels, dédiés à une tâche bien précise, ont vu le jour. Ils mettent en oeuvre des méthodes de calcul parfois très sophistiquées et répondent, de la façon la plus précise, aux questions qui sont posées. Toutefois, des études de marchés, par exemple Seth (1989), montrent que de nombreux logiciels disponibles dans le domaine du bâtiment ne sont pas couramment utilisés par les milieux professionnels ciblés. Ce manque d'utilisation résulte principalement de la trop grande difficulté de manipulation des logiciels en ce qui concerne la préparation et l'introduction des données, la sélection et l'interprétation objective des résultats. De plus, un outil informatique donné ne répond qu'à un seul aspect du problème et le caractère pluridisciplinaire de l'art de construire implique que la considération d'une seule facette ne suffit pas.

Toutes ces raisons ont motivé la mise en chantier d'un grand nombre de projets visant à renforcer l'utilisation des logiciels spécialisés dans le domaine du bâtiment en apportant convivialité et caractère intégrateur.

Un survol des différents systèmes projetés ou développés au cours des 15 dernières années montre qu'ils ressortent à trois catégories qui, néanmoins, possèdent de nombreuses interactions :

- les développements de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur)
- les apports de l'Intelligence Artificielle
- les techniques de représentation synthétique standardisée de l'information

De nombreux systèmes présentent des développements dans plusieurs de ces directions, ce qui amplifie leur caractère intégrateur.

1.5.1. Conception Assistée par Ordinateur

Un nombre croissant de systèmes apparaissent disponibles et atteignent à une maturité incontestable. Les caractéristiques de ces systèmes permettent une introduction plus rapide de toutes les données géométriques d'un bâtiment. La tentation a dès lors été grande d'associer un tel logiciel avec des programmes d'évaluation (par exemple thermique ou d'éclairage) situés en aval. Dans de tels systèmes, le logiciel de dessin agit plutôt en tant que préprocesseur du logiciel d'évaluation.

Dans cet ordre d'idées, Green (1989b) présente la problématique générale de l'association de la CAO et des méthodes de calcul thermique. Green (1989a) propose un exemple d'association basée sur le logiciel "Scribe Modeller". Ce dernier est couplé à des programmes thermiques, d'éclairage et d'estimation des coûts. Schmitt (1989) propose un préprocesseur architectural pour des systèmes experts en ingénierie ("Archplan"). Abed et al (1989) présentent un système d'évaluation thermique construit autour d'un logiciel de CAO. Compagnon et al. (1992) ont débuté le développement d'un lien entre un programme de CAO et plusieurs outils de calcul d'éclairage naturel.

De manière générale, deux approches apparaissent complémentaires : soit l'adjonction de fonctionnalités d'évaluation au sein du logiciel de CAO; soit le couplage, par l'intermédiaire d'un module d'interface, entre un logiciel de CAO et un logiciel d'évaluation.

1.5.2. Intelligence Artificielle et Systèmes Experts

Le développement et les promesses de l'Intelligence Artificielle ont bouleversé le paysage informatique de ces vingt dernières années. D'abord considérée comme un mythe, l'Intelligence Artificielle a pénétré la plupart des domaines d'utilisation de l'Informatique et a fait l'objet d'un nombre de plus en plus important d'applications qui, tout en affirmant davantage la maturité de l'outil, ont de mieux en mieux permis de cerner ses limites :

l'ordinateur ne simulera jamais la complexité du raisonnement humain ! En particulier, la technologie des Systèmes Experts, si prometteuse à ses débuts, n'a débouché que sur un nombre réduit d'applications réellement efficaces. Paradoxalement, ces échecs ont permis de mieux cerner les potentialités de l'approche et la tendance actuelle semble de revenir à des objectifs plus modestes mais réalisables.

Dans le domaine des logiciels intégrés d'aide à la conception de bâtiments, les Systèmes Experts occupent une place de choix. Ils agissent en tant que coordonnateurs du système, ou en tant que gestionnaires ("intelligents") d'interfaces, ou encore comme modules d'évaluation ("experts") du projet.

Dans la première catégorie, on trouve le système proposé par Bryn (1990) qui est plutôt un système d'information sur le design des atrium; d'autres systèmes concernent le domaine spécifique de la planification des travaux dans un projet de construction. Zozaya-Gorostiza et al (1990) et Chang et Ibbs (1990) présentent de tels systèmes.

Dans la seconde approche, on trouve les travaux de Rehak et Howard (1985) et Howard et Rehak (1989) sur le développement de systèmes d'interfaces intelligents couplant systèmes experts et bases de données.

Enfin, la troisième approche apparaît comme la plus féconde. Dans cette tendance, le système expert est considéré comme un "assistant" au concepteur qui est capable d'effectuer, à tout moment, une tâche d'expertise du projet en cours. A cette catégorie émergent les systèmes proposés par Carrara et Novembri (1990), Rosenman et Gero (1985), Rosenman et al (1986), Rosenman (1990), Faist et al (1989), Morel et Hagen (1991), Robin et Brau (1989), Robin et al (1991).

1.5.3. Représentation synthétique et standardisée des données

Il s'agit également d'une approche en pleine expansion dont l'objet est de développer des structures de données (modèles informatiques) souples et puissantes permettant de gérer des projets de grande envergure. La plupart des approches actuelles sont basées sur les concepts de la Programmation Orientée Objet (POO) qui propose des solutions répondant aux critères désirés. On notera particulièrement les travaux en cours en Finlande (VTT) (Björk, 1992), (Björk, 1989), (Björk et Penttilä, 1989), ainsi que ceux associés à la première phase du projet "Combine" des Communautés Européennes (Augenbroe et Winkelman, 1991), (Augenbroe, 1992), (Augenbroe et al, 1991). D'autres approches sont proposées par Pols (1991a), Pols (1991b). L'objectif commun de ces différentes approches est d'aboutir à une représentation permettant une intégration effective de la démarche de conception d'un bâtiment. Certaines approches (Luiten et al, 1992), (Augenbroe et al, 1991) (Turner, 1992),

(Fenves, 1991), utilisent le concept de diagrammes "NIAM" pour représenter les objets et les relations qui les unissent de façon standardisée.

Wade (1992) présente les problèmes théoriques sous-jacents à la définition d'une représentation compacte du bâtiment, à savoir les problèmes de typologie dans l'industrie de la construction. Des approches, essentiellement conceptuelles, sont proposées par Eastman (1992), Wright et al (1992), Sanvido (1992), Lakmazaheri et Rasdory (1992), Zamanian et al (1992), De La Garza et Oralkan (1992) et attestent du caractère récent de ce domaine de recherche.

1.5.4. Logiciels intégrés

Les approches les plus complètes ne se contentent pas d'explorer l'une des voies proposées ci-dessus mais ont pour ambition d'associer plusieurs de ces ressources au sein d'un logiciel intégré. Globalement, le logiciel s'appuie sur une représentation centralisée du bâtiment, utilisant les concepts de la Programmation Orientée Objet et réalise la connexion ou l'interfaçage de différents modules vis-à-vis de cette représentation. A cette catégorie de logiciels appartiennent les projets SETIS (Robin et al, 1991), (Robin et Brau, 1991), AEDOT (Brambley et al, 1990), (Brambley et al, 1993), IBDE (Fenves et al, 1990), CONCEPTOR (Achard et al, 1991a), (Achard et al, 1991b), le projet de l'EPFL (Morel et Hagen, 1990), (Morel et Hagen, 1991), EKS (Clarke, 1988), RETEX (Hertkorn, 1991), (Hertkorn, 1993), BESA (Blake et al, 1993), INTEGRIS (Duppenthaler et Mantel, 1993), qui tous présentent un prototype dans un état de développement plus ou moins avancé. Le projet français ALMETH a étudié la problématique de la connexion de différents outils logiciels au sein d'un "atelier" en développant la science de la "connectique" (Dubois et al, 1991), (Bonin et al, 1991). Le système ICADS (Myers et al, 1992) constitue les bases du système AEDOT sous la forme d'un logiciel de CAO "intelligent" incorporant des "modules experts" dans le domaine de l'accessibilité, de la thermique, du coût, de l'éclairage, de l'acoustique, de la structure. Différents prototypes de ce système sont actuellement disponibles.

D'autres projets apparaissent dans un état de développement plus sommaire. C'est le cas de IBDPES (Parand, 1993), IBIPS (Van Doninck, 1993), LogoCAD (Willan, 1993), BEANS (Ove Arup Partners, 1993), FACET (Facet Ltd, 1993), IFE (Rutherford Appleton Laboratory, 1993). A l'opposé, des systèmes apparaissent déjà commercialisés par Intergraph (Intergraph, 1993), IBM (Stordeur, 1990) et autour de GDS (Bigler, 1993).

Ce survol montre que le développement de logiciels intégrés constitue un souci particulièrement actuel dans le domaine de la conception et de la construction de bâtiments. Tous les projets évoqués ci-dessus travaillent dans la même direction et s'appuient sur des concepts identiques même si chacun apparaît différent des autres avec son originalité et sa façon particulière d'aborder une des facettes du problème.

1.5.5. La thèse par rapport à l'état de la question

A première vue, la démarche suivie par cette thèse pourrait ne constituer que la proposition d'un système supplémentaire par rapport à ceux déjà existant. Il faut toutefois noter l'existence de certains objectifs spécifiques qui confèrent à ce travail un caractère original.

Tout d'abord, la problématique est envisagée dans le contexte global de l'environnement. L'accent est en effet placé sur la mise au point d'une méthodologie de développement de logiciels ayant pour but de proposer un produit transposable et réutilisable pour toute une gamme d'applications.

Par ailleurs, le contexte pluridisciplinaire et multicritère implique le développement des procédures d'arbitrage entre les différents intervenants. Cette thèse envisage d'utiliser l'analyse multicritère dans ce but et cette démarche n'est que très rarement effectuée dans les systèmes décrits ci-dessus.

Enfin, cette thèse met également l'accent sur le caractère modulaire du logiciel intégré, impliquant en particulier la possibilité de fonctionner avec ou sans un intervenant particulier : un module est "enfiché" dans le système par l'intermédiaire d'une interface dédiée, ce qui rend le logiciel intégré extensible et rétractable à souhait.

Ces différentes particularités montrent l'originalité de la démarche proposée en la situant par rapport à l'évolution actuelle dans ce domaine.

1.6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre a jeté les bases du travail en situant la thèse dans le contexte de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise, de la cellule "Energie" et de l'activité contractuelle liée à la participation à deux projets de l'Agence Internationale de l'Energie. Par ailleurs, la problématique environnementale sous-jacente a permis de dégager les objectifs spécifiques de la thèse, liés aux caractères pluridisciplinaire et multicritère des problèmes d'environnement et à leur répercussion sur les outils, en particulier l'outil informatique, utilisés. En fonction de ces objectifs, une démarche scientifique progressive et rigoureuse a été définie. Enfin, ce projet a été situé dans le cadre actuel de la recherche dans ce domaine en insistant sur les originalités de la démarche et des objectifs par rapport à la tendance générale dans le secteur du développement de logiciels intégrés.

CHAPITRE 2.

OBSERVATION

2.1. INTRODUCTION

A la base de toute démarche scientifique repose l'observation. Toutes les lois de la physique et de la nature ont été déduites de l'observation et de l'expérience et tous les modèles théoriques ne deviennent valides et fiables qu'à partir du moment où l'expérience les confirme. Par conséquent, cet aspect se doit de figurer dans une démarche telle que celle entreprise dans cette thèse. En effet, tous les intervenants et toutes les ressources informatiques utilisées dans cette recherche ne trouvent de sens que s'ils correspondent à une réalité sur le terrain. L'observation occupe même à notre sens, une place fondamentale dans la démarche dans la mesure où elle conditionne toute la suite du travail : elle apparaît solidaire de la modélisation pour produire un modèle validé et calibré; elle fournit les matières premières à la théorie des systèmes; elle alimente les programmes de simulation numérique (par exemple par l'intermédiaire des données météorologiques) et les bases de données; elle détermine le contenu des bases de connaissances des systèmes experts et les conclusions qu'ils permettent d'inférer. Dès lors, l'analyse expérimentale apparaît bien omniprésente, ce qui justifie le rôle de "fondation" qui lui est donnée dans ce texte.

Dans ce chapitre, l'utilisation des ressources de la mesure et de l'observation dans un contexte de prise de décision sera illustrée par la démarche entreprise sur le bâtiment académique de la FUL dans le cadre du projet IEA Task XI (1.2.1.1.). Seront présentés successivement le système mesuré, les objectifs, la méthodologie, le plan de mesures et son implémentation, les principaux résultats liés à la mise en place de cette démarche. Pour clôturer, la généralisation tentera de montrer l'adéquation de la stratégie à d'autres problèmes d'environnement.

2.2. PRÉSENTATION DU SYSTÈME MESURÉ(ANDRÉ, 1992 B)

Un des aspects essentiels du projet IEA TASK XI consistait en une approche expérimentale centrée sur le bâtiment-test sélectionné, en l'occurrence le bâtiment académique de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise, pour ce qui est de la participation de la FUL à ce projet.

Ce bâtiment a été mis en chantier en 1985 afin de procurer des locaux au service académique de l'Institution. Etant donné les antécédents solaires de l'Institution (les autres bâtiments sont de types solaires actifs), une conception solaire passive, combinant des murs accumulateurs, des zones à gain direct et un niveau d'isolation élevé, a été retenue.

2.2.1. Description du bâtiment
(André et al, 1991 c), (IEA Task XI, 1989)

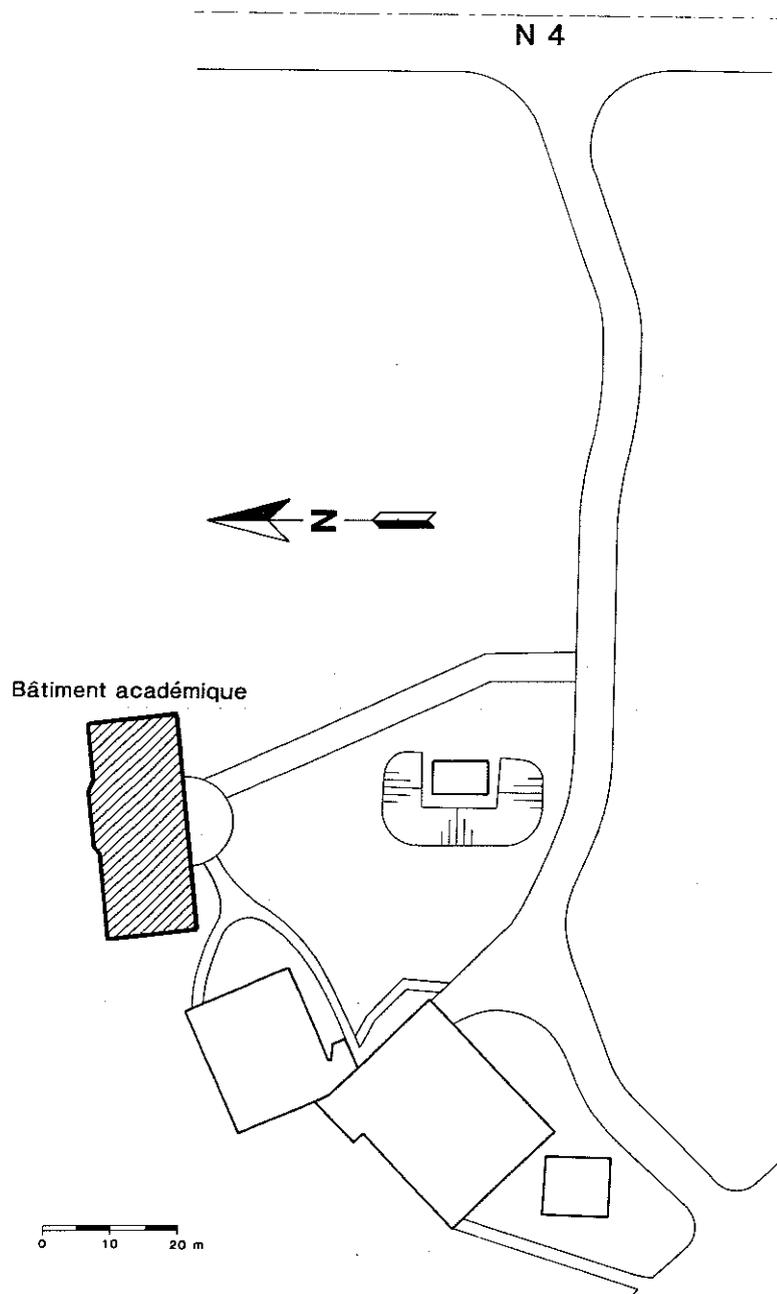


Fig. 2.1. Vue en plan du site d'implantation du bâtiment

Le bâtiment académique de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise est un bâtiment solaire passif de 2.200 m³ et deux niveaux - abritant, au rez-de-chaussée, des auditorios (60 et 120 places) et un hall central et, à l'étage, des bureaux et salles de réunions. Le bâtiment est situé dans la périphérie d'Arlon, à proximité d'une route à grand trafic (N4) et sur un terrain relativement horizontal. Il est orienté plein sud et n'est pratiquement pas occulté par les obstacles naturels sauf en fin d'après-midi lorsque le soleil disparaît derrière les autres bâtiments de l'Institution (fig. 2.1)

La forme du bâtiment est très caractéristique du solaire passif et correspond au désir conjugué de tirer un profit maximum des ressources énergétiques naturelles tout en limitant au maximum les pertes vers l'environnement. Le bâtiment est ainsi construit suivant un axe principal est-ouest, possède une ouverture importante vers le sud et se présente, par contre, de façon tout à fait refermée vers le nord. Le contraste apparaît dès lors saisissant entre la façade sud (fig. 2.2), de surface maximale et vitrée, et la façade nord, de surface minimale et pratiquement totalement opaque (fig. 2.3). Une partie des locaux du niveau inférieur, les auditorios en gradins, se trouve enterrée en dessous du niveau du sol; cette disposition particulière vise de nouveau à limiter les déperditions thermiques vers l'environnement.

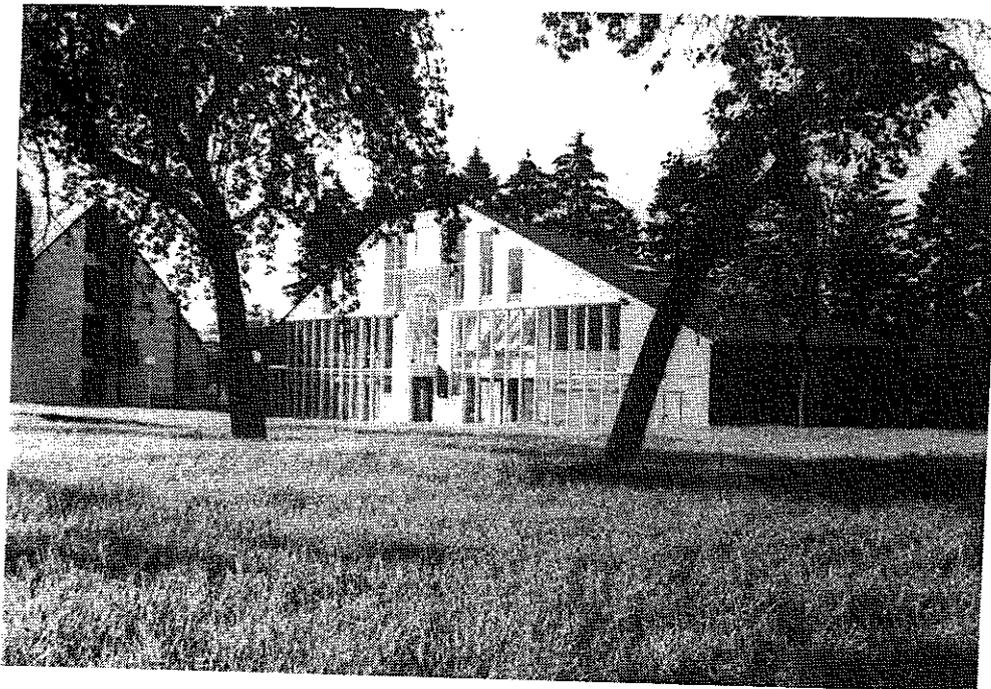


Fig. 2.2. Photographie de la façade sud du bâtiment

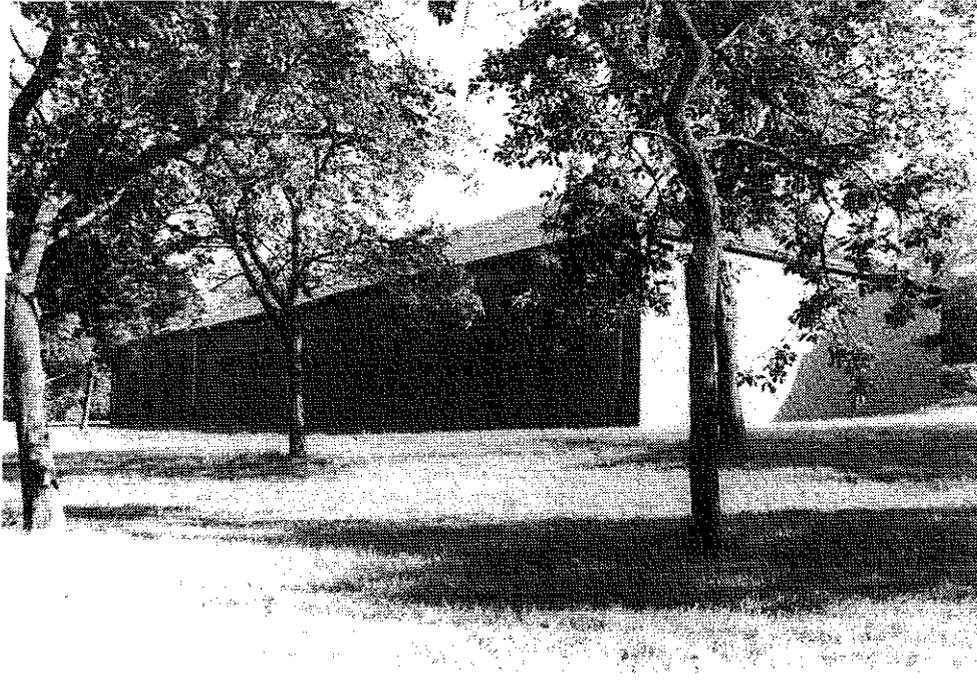


Fig. 2.3. Photographie de la façade nord du bâtiment

La structure portante du bâtiment est constituée, pour les façades nord et sud par des profilés de béton armé dont la fonction thermique sera détaillée plus loin et, pour les autres façades par des murs en blocs de béton de 25 cm d'épaisseur. Toute la surface non vitrée du bâtiment a reçu une isolation thermique constituée d'une couche de 12 cm de laine de verre et une couverture en ardoises pour la protection contre la pluie. La dalle de sol du bâtiment est constituée de béton armé et isolée. Les deux niveaux ont été séparés par une dalle en béton armé de 25 cm d'épaisseur et d'autres éléments en béton armé ont été placés çà et là dans le bâtiment, (poutres, rebords de dalle, escaliers,...) de façon à en accroître l'inertie thermique, laquelle apparaît extrêmement importante. La toiture d'ardoise a reçu une épaisseur d'isolation de 22 cm sous la forme de laine de verre soutenue par des panneaux de laine minérale rigide. Les partitions intérieures sont constituées de blocs de maçonnerie de 19 cm pour les murs porteurs et de 9 cm pour les autres.

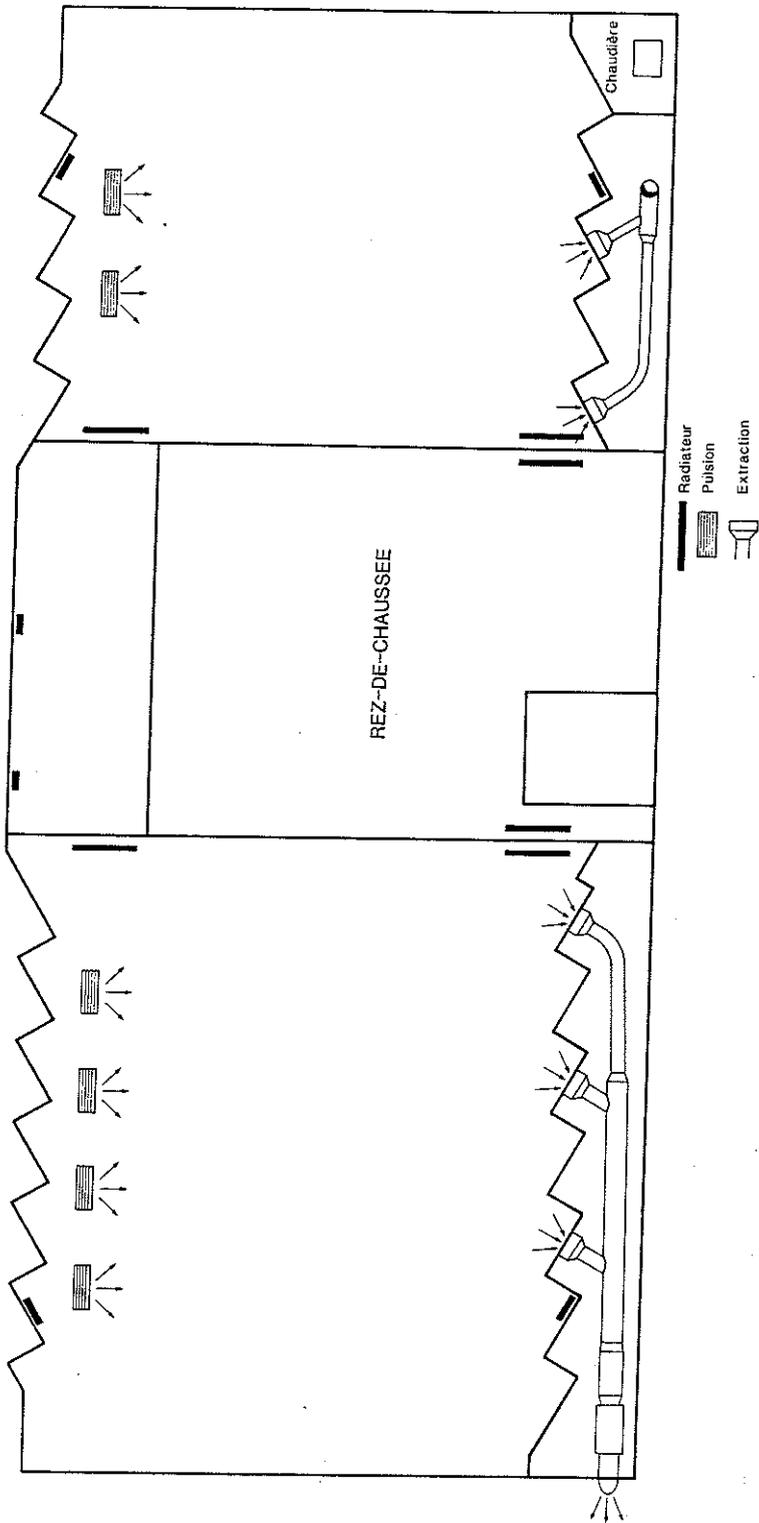


Fig. 2.4a. Vue en plan du rez-de-chaussée du bâtiment

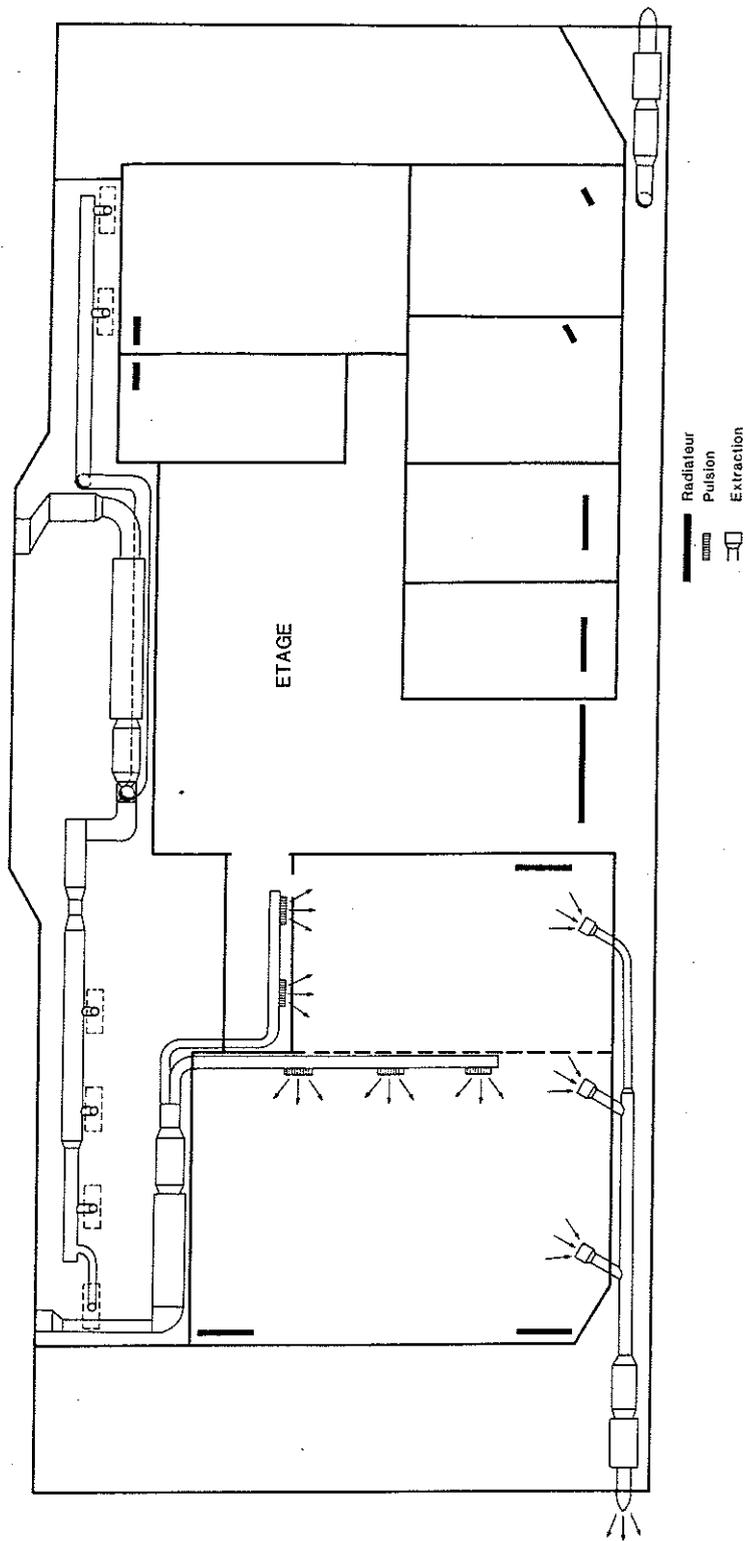


Fig. 2.4b. Vue en plan du premier étage du bâtiment

2.2.2. Systèmes solaires passifs

La conception solaire passive est principalement caractérisée par la présence d'une zone à gain direct dans la partie centrale du bâtiment et le placement de murs de masse dans les parties latérales. Les murs de masse, situés en façade sud sont constitués de 3 éléments : un vitrage, double et à haute émissivité, un mur construit en profilés en béton armé, placés de façon oblique par rapport au vitrage et séparés par des vitres intérieures et, entre ces deux éléments, un espace tampon ou serre, suffisamment large que pour permettre le passage, ce qui en facilite également l'entretien. Les murs ont été peints en blanc, pour des raisons d'apparence architecturale et ont été percés, au second niveau de fenêtres intérieures supplémentaires destinées à accroître l'éclairage naturel dans les bureaux et les salles de réunions. La zone à gain direct est principalement constituée d'un vitrage, double lui aussi, directement connecté avec les locaux (halls) des niveaux inférieurs et supérieurs. Ces zones sont toutefois également caractérisées par une inertie importante due à la présence de dalles, poutres, escaliers, rebords en béton armé. Globalement, la façade sud est vitrée pour les 2/3 de sa surface, soit 135 m² de vitrage. Afin de réduire les déperditions nocturnes au travers de ce vitrage et les risques de surchauffe en période ensoleillée, des volets occultants ont été placés sur la face extérieure du vitrage et sont activés, soit automatiquement par une horloge préprogrammée, soit manuellement par les occupants du bâtiment.

2.2.3. Systèmes auxiliaires

Indépendamment des différents systèmes solaires passifs, le bâtiment est équipé d'un système de chauffage auxiliaire centralisé sur une chaudière à gaz et muni de deux circuits de distribution (un pour la façade nord et un autre pour la façade sud) constitués de radiateurs. Trois systèmes de contrôle sont imbriqués pour maintenir la température dans les locaux : un aquastat de chaudière, des actionneurs agissant sur des vannes trois voies et agissant sur la température de l'eau dans chacun des circuits de distribution, des vannes thermostatiques au niveau de chacun des radiateurs. Par ailleurs, des systèmes de ventilation mécanique ont été installés dans les locaux auditoires, bureaux et réunions. Ces systèmes sont commandés par une sonde de température en cas de surchauffe, par une sonde de détection de contaminants dans les locaux, par une horloge programmable ou encore manuellement, à la demande.

2.3. DÉFINITION DES OBJECTIFS

Conformément aux exigences du projet IEA Task XI et en fonction des intérêts particuliers de la Cellule Energie de la FUL, les objectifs de l'analyse expérimentale du bâtiment académique de la FUL ont été définis comme suit:

1. Evaluation de la performance thermique du bâtiment, en particulier de la contribution solaire passive du mur de masse.
2. Evaluation du logiciel belge "MBDSA" par rapport aux données collectées sur le terrain.
3. Application de techniques mathématiques d'identification de systèmes pour la détermination du comportement thermique dynamique du mur de masse.
4. Evaluation, par la méthode de Fanger, du confort thermique dans le bâtiment.

La définition de ces 4 objectifs a motivé la mise en place d'une méthodologie d'analyse appropriée et d'un plan d'instrumentation apte à rencontrer ces objectifs.

2.4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE (André et al., 1987)

Préalablement à la mise en place de l'investigation expérimentale, une réflexion méthodologique a eu lieu de façon à permettre une adéquation maximale entre objectifs et méthodes.

Tout d'abord, l'analyse expérimentale a été replacée dans le contexte général du projet IEA Task XI, en particulier les différentes sous-tâches de ce projet :

Sous-tâche "A"	: Etudes de cas
Sous-tâche "B"	: Modèles de simulation
Sous-tâche "C"	: Directives de conception

Pour ce faire, les interactions entre les différentes sous-tâches ont été prises en compte au travers de l'organigramme représenté à la figure 2.5. Cet organigramme met en évidence une phase d'analyse où les mesures servent à l'identification d'un modèle mathématique et une phase de simulation où les mesures sont comparées aux prévisions d'un modèle de simulation de façon à générer des études paramétriques sur le bâtiment.

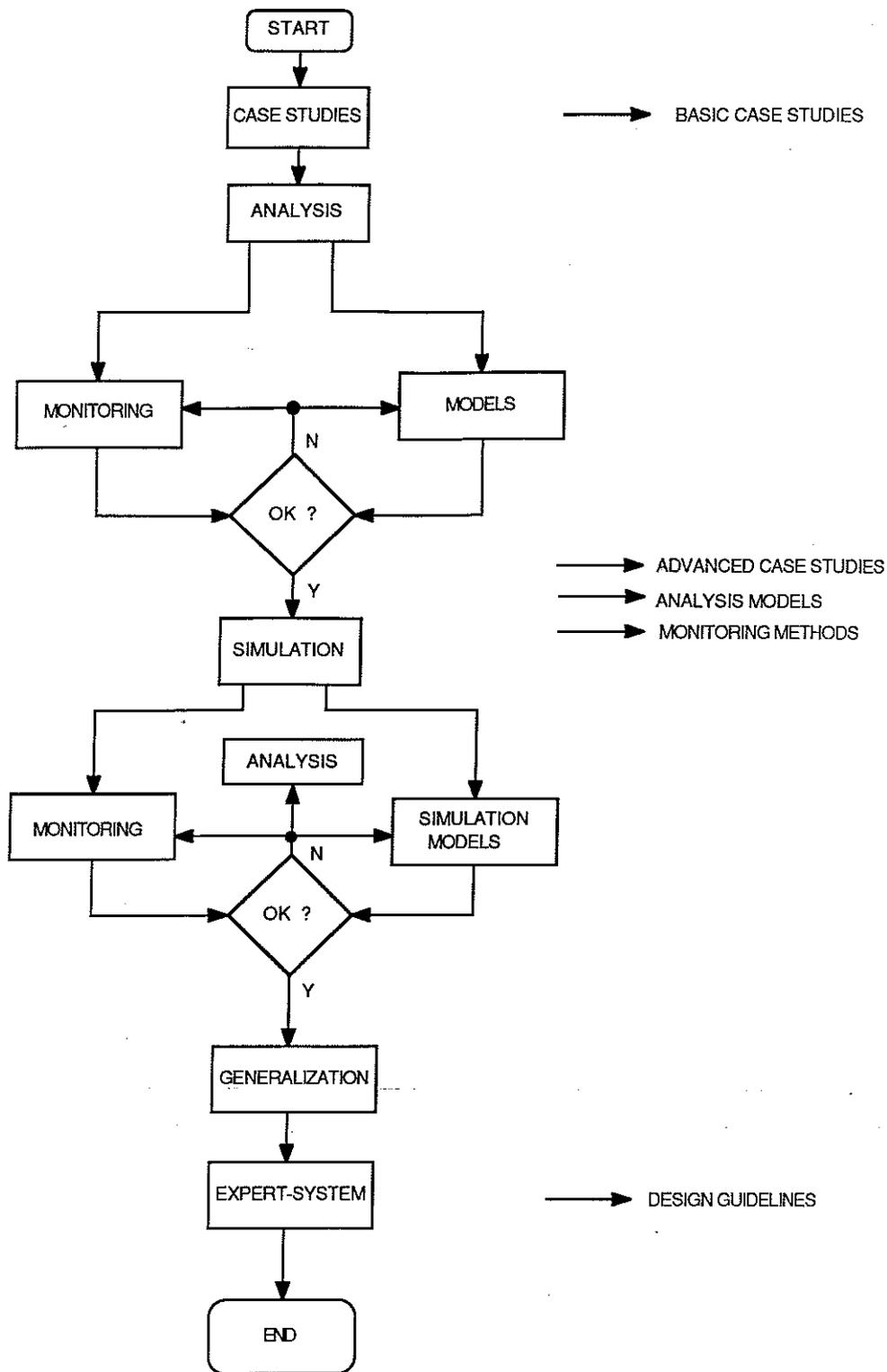


Fig. 2.5. Organigramme de la méthodologie expérimentale proposée par la FUL pour le projet IEA Task XI

En résumé, il existe une interaction étroite entre les différentes sous-tâches qui fait qu'elles se renforcent naturellement sous la forme d'un "tripôle" représenté à la figure 2.6.

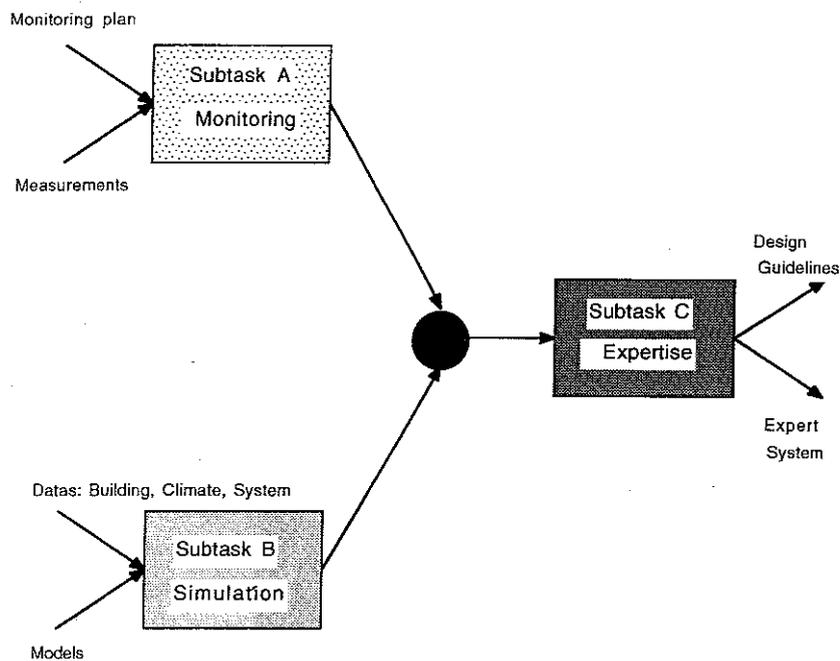


Fig. 2.6. Structure schématique du projet IEA Task XI

Ensuite, l'élaboration de la méthodologie s'est poursuivie par une analyse plus précise du bâtiment en adoptant une approche systémique concrétisée par la division du bâtiment en sous-systèmes correspondant aux fonctions réalisées, du point de vue de l'énergie et du confort thermique. La division, pour arbitraire qu'elle soit, permet d'analyser les performances individuelles des composants et de détecter l'éventuelle occurrence de points faibles ou d'un maillon déficient dans la chaîne de transfert énergétique. Cette décomposition a abouti aux sous-systèmes suivants :

- l'environnement du bâtiment : le climat et les occupants
- le vitrage et le dispositif d'occultation associé
- la serre ou "espace-tampon"
- le mur accumulateur
- les différentes zones du bâtiment
- l'enveloppe du bâtiment
- le système de chauffage du bâtiment
- le système de ventilation mécanique
- le système de contrôle.

Pour chacun de ces sous-systèmes ont été définis successivement :

- les objectifs de leur investigation
- les méthodes utilisées
- les outils permettant de mettre ces méthodes en oeuvre
- les produits de l'investigation du sous-système

A titre d'exemple, mentionnons les 4 points de l'analyse pour le sous-système "mur accumulateur" :

- Objectifs :
1. Analyse du mur comme système accumulateur
 2. Analyse des phénomènes de délai et atténuation
- Méthodes :
1. Analyse des phénomènes convectifs et radiatifs en surface
 2. Analyse de la conduction à travers le mur
- Outils :
1. Mesures des températures de surface, des températures dans le mur
 2. Mesures de flux thermiques
 3. Algorithmes d'identification
 4. Imagerie infrarouge
- Produits :
1. Caractéristiques thermiques du mur accumulateur
 2. Dimensionnement du système
 3. Influence du volume et de l'orientation du mur.

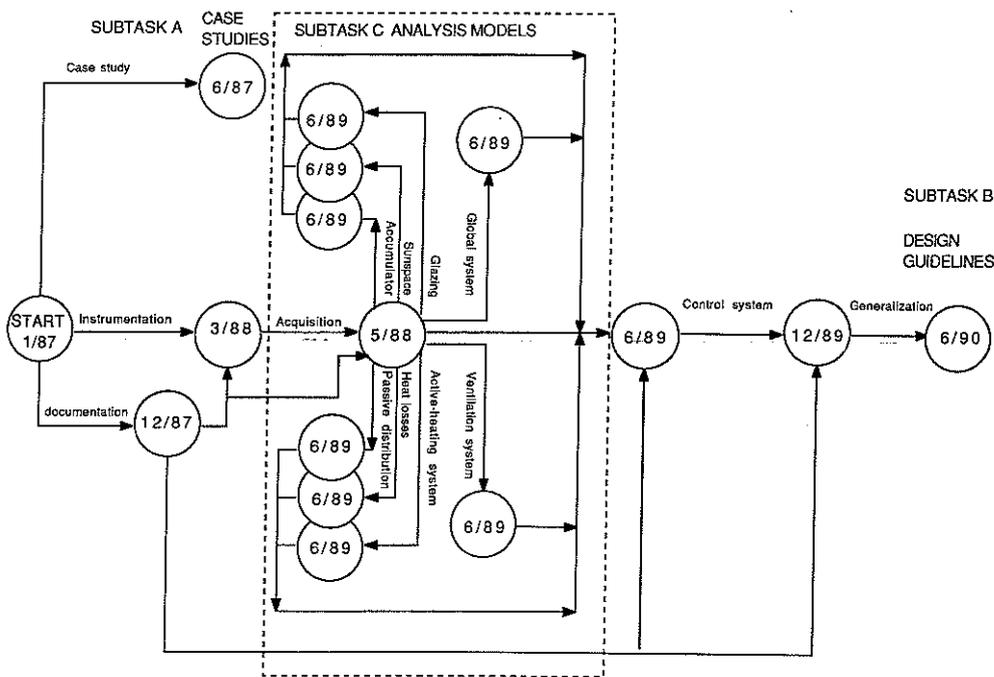


Fig. 2.7. Planning de travail de l'analyse expérimentale

Pour plus de détails, le lecteur se référera à André et al (1987).

Enfin, la méthodologie a été conclue par l'établissement d'un planning de travail, en phase avec celui prévu pour l'évolution du projet IEA Task XI par ses dirigeants (fig. 2.7.).

2.5. PLAN DE MESURES ET IMPLÉMENTATION

2.5.1. Généralités

Suite à l'élaboration de cette méthodologie, un plan de mesures a été proposé. La préparation et l'implémentation d'un plan de mesure constituent une étape-clé dans la perspective du succès d'une campagne de mesures (Fracastoro, 1990). Elles conditionnent en effet la validité et la fiabilité des résultats obtenus ainsi que leur pertinence.

Dans le cadre de cette étude, deux campagnes de mesures préliminaires de courte durée (3..4 semaines), ont été mises en oeuvre, l'une en été et l'autre en hiver, préalablement à l'investigation du bâtiment proprement dite. Ces campagnes impliquaient un nombre limité de capteurs (une dizaine) dans quelques zones typiques du bâtiment et avaient comme objectif principal une familiarisation avec les instruments de mesurer, le système d'acquisition, le transfert et l'analyse des données recueillies ainsi qu'une première approche, relativement qualitative, des phénomènes thermiques caractérisant le bâtiment.

Suite aux enseignements de ces opérations préliminaires, un plan de mesures précis et détaillé a été élaboré de façon à satisfaire les objectifs de l'analyse.

2.5.2. Choix des points de mesure

Le choix des points de mesure et des variables physiques mesurées a été opéré en fonction de la division du bâtiment en sous-systèmes et des méthodes et outils requis pour l'analyse de chaque sous-système. D'autre part, les objectifs généraux de l'investigation ont également conditionné l'implantation des points de mesure. C'est ainsi que le bâtiment a été divisé en 10 zones thermiques :

1. Serre ouest
2. Serre est
3. Auditoire ouest

4. Auditoire est
5. Hall rez-de-chaussée
6. Toilette
7. Hall étage
8. Salles de réunion
9. Bureaux
10. Grenier

La disposition de ces zones est représentée par la figure 2.8.

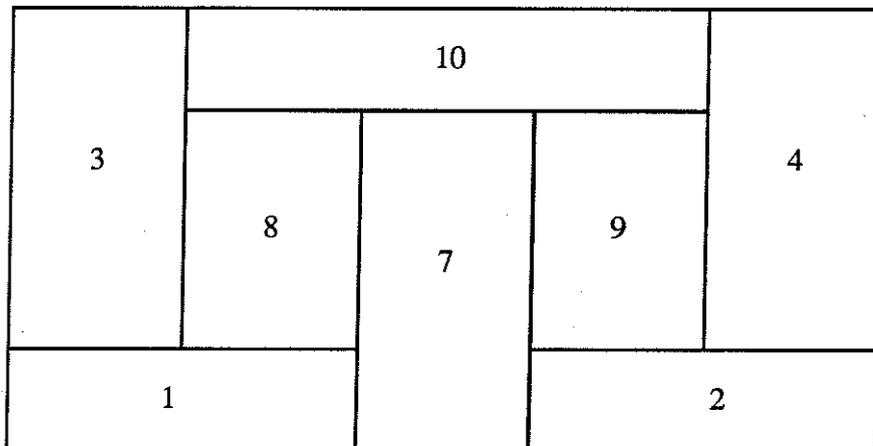
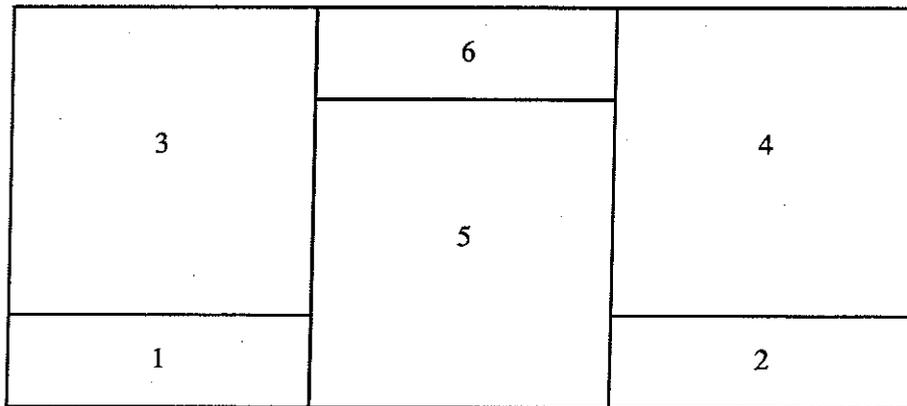


Fig. 2.8. Répartition des zones thermiques du bâtiment

SUB-SYSTEM	MEASURED VARIABLE	CAPTOR TYPE	ACQUISITION PERIOD	ACQUISITION FREQUENCIES	OBJECTIVES
CLIMATE	Global horizontal external radiation	Solarimeter Kipp Zonen CM6	01/06/88 - 01/06/89	3 min / 15 min integration	3
	Diffuse horizontal external radiation	Solarimeter Kipp Zonen CM11/121	01/01/89 - 01/06/89	3 min / 15 min integration	[3] 4
	Beam external radiation	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
	External air temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
OCCUPANTS	CO2 pollution rate Zone 3	Switch ON/OFF	01/09/89 - 01/06/89	15 min	2 [3] 4
	CO2 pollution rate Zone 4	Pyranometer Empley	01/06/88 - 01/06/89	3 min / 15 min integration	2 [3] 4
	Door status	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2 [3] 4
		CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
GLAZING	Global horizontal internal radiation	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	[3] 4
	Outer surface temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
	Inner surface temperature	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
		CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
SUNSPACE	Air temperature, module 1	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	[3] 4
	Resultant temperature, module 1	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
	Hot wire temperature, module 1	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Cold wire temperature, module 1	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, module 2	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	[3] 4
	Resultant temperature, module 2	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
	Hot wire temperature, module 2	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Cold wire temperature, module 2	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, module 3	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	[3] 4
	Resultant temperature, module 3	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
	Hot wire temperature, module 3	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Cold wire temperature, module 3	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
ACCUMULATOR	Air temperature, module 4	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	[3] 4
	Resultant temperature, module 4	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
	Hot wire temperature, module 4	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Cold wire temperature, module 4	CTN UUT45J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
ACCUMULATOR	Outer surface walls temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	6.25 cms depth walls temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	12.50 cms depth walls temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	18.75 cms depth walls temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Inner surface walls temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
Concrete slab temperature	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3	

Tableau 2.1a. Description des variables mesurées, première partie

SUB-SYSTEM	MEASURED VARIABLE	CAPTOR TYPE	ACQUISITION PERIOD	ACQUISITION FREQUENCIES	OBJECTIVES
PASSIVE DISTRIBUTION	Air temperature, Zone 2	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, Zone 3	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
	Air temperature, Zone 4	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, Zone 5	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
	Air temperature, Zone 6	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, Zone 7	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
	Air temperature, Zone 8	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Air temperature, Zone 9	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	4
	Air temperature, Zone 10	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	3
	Resultant temperature, Zone 2	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2
Resultant temperature, Zone 3	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 4	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 5	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 6	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 7	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 8	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 9	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
Resultant temperature, Zone 10	CTN UUA41J1	01/06/88 - 01/06/89	15 min	2	
HEAT LOSSES	Infrared picture Walls heat fluxes	Infrared camera Flux-meter	01/06/88 - 01/06/89 01/06/88 - 01/06/89	Occasionally Occasionally	[3] 3
ACTIVE HEATING	Electrical consumption Gas consumption	Electrical counter Gas counter	01/06/88 - 01/06/89 01/06/88 - 01/06/89	2 / day 2 / day	4 4
VENTILATION	Electrical consumption " on " period	Electrical counter Graphical recorder			2 3 4
WHOLE BUILDING	Electrical consumption Gas consumption	Electrical counter Gas counter	01/06/88 - 01/06/89 01/06/88 - 01/06/89	2 / day 2 / day	1 1

Tableau 2.1b. Description des variables mesurées, seconde partie

Le tableau 2.1. indique, pour chaque sous-système du bâtiment, les variables mesurées et leur localisation, le capteur utilisé, la période de mesure préalablement choisie, la période d'échantillonnage et les objectifs (parmi ceux énumérés en 2.3.) que la mesure poursuit.

Cette instrumentation comprend plus de 60 capteurs qui mesurent les grandeurs suivantes : rayonnement solaire global, diffus et normal, températures d'air extérieure et intérieure, températures résultantes, températures de surface, températures de mur, vitesses d'air, état d'ouverture des portes, flux thermique, consommation de gaz et d'électricité, carte thermique de l'enveloppe du bâtiment, niveau d'infiltration.

2.5.3. Choix des capteurs

A. RAYONNEMENTS SOLAIRES

Le rayonnement solaire global a été mesuré au moyen d'un pyranomètre ("Kipp and Zonen", modèle CM 6). Le rayonnement solaire diffus a été détecté par un pyranomètre muni d'un anneau mobile occultant ("Kipp and Zonen", modèle CM 11/121). Pour mesurer le rayonnement normal, un dispositif a été spécialement construit à la FUL, constitué d'un pyranomètre monté sur un plateau disposant de deux degrés de liberté de rotation autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal. La rotation autour de ces deux axes est actionnée par un moteur électrique déclenché par un déséquilibre lumineux entre deux cellules photoélectriques placées suivant un angle égal de part et d'autre de l'axe de rotation. La figure. 2.9 représente les différents dispositifs de mesure du rayonnement solaire.

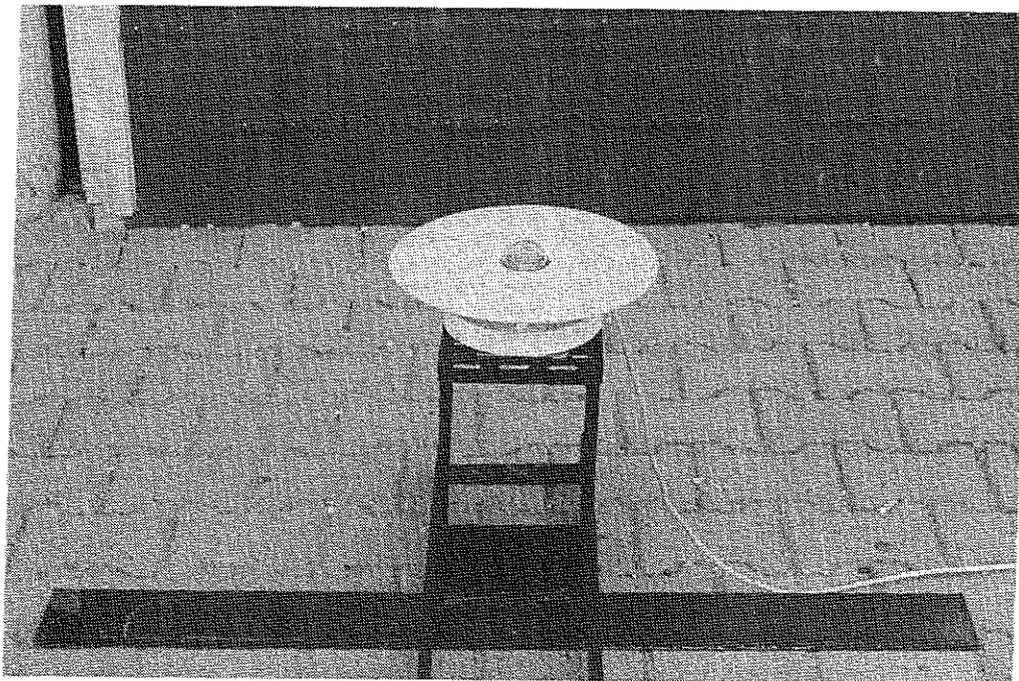


Fig. 2.9a. Dispositif de mesure du rayonnement solaire global

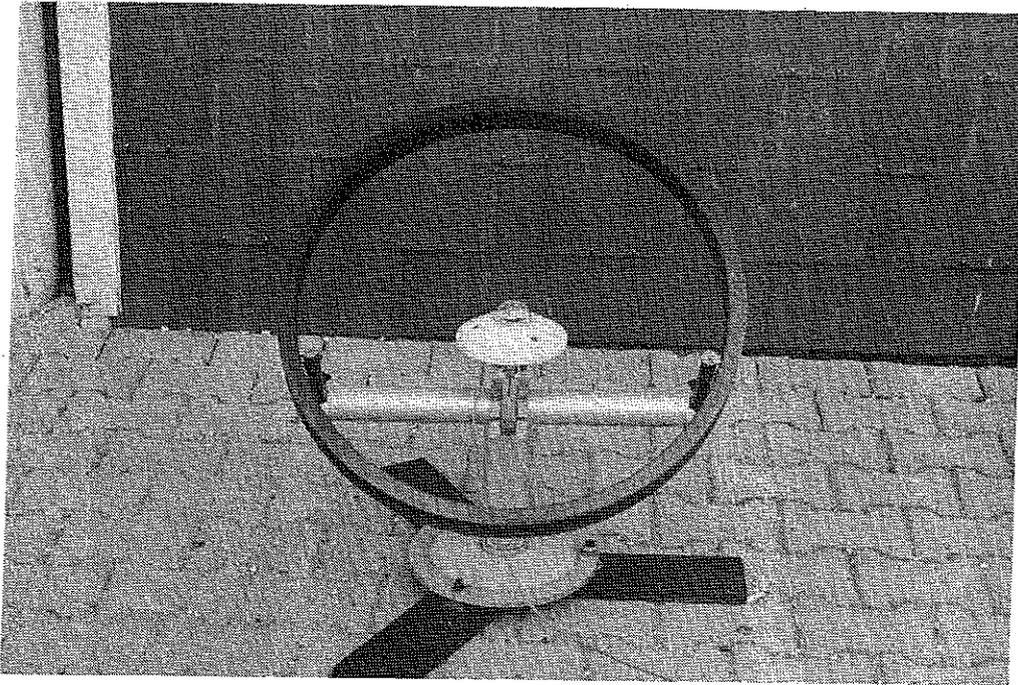


Fig. 2.9b. Dispositif de mesure du rayonnement solaire diffus

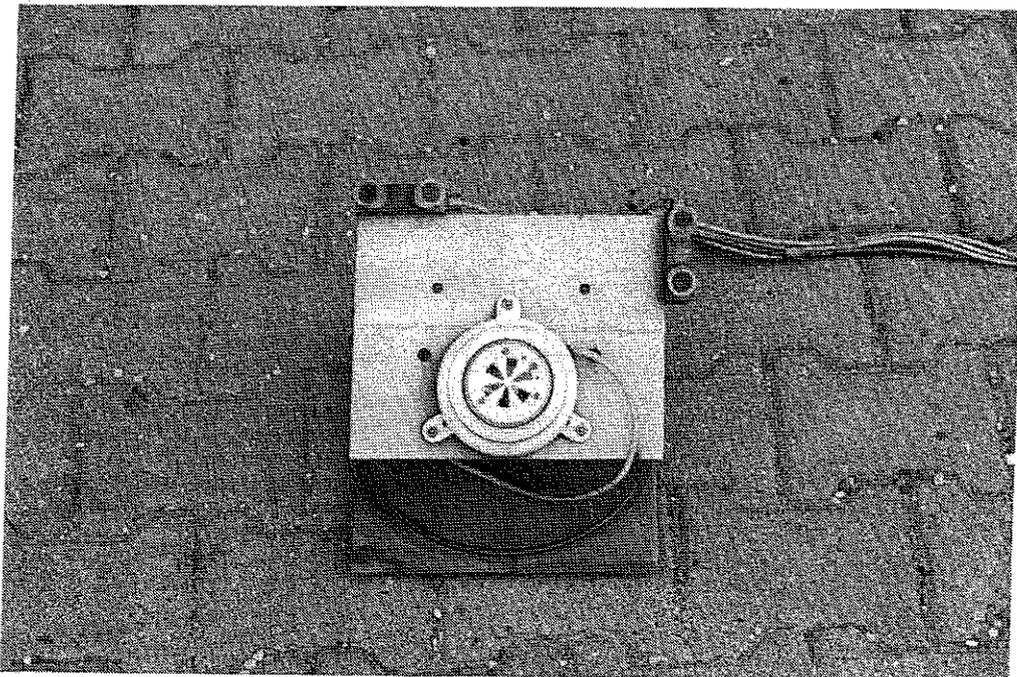


Fig. 2.9c. Dispositif de mesure du rayonnement solaire normal

Ce dernier dispositif mesure le rayonnement global normal au contraire de dispositifs disponibles dans le commerce qui, eux, mesurent le rayonnement direct normal.

B. TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE

Pour mesurer la température extérieure, une thermistance de type "CTN" (coefficient de température négatif) a été placée au centre d'un dispositif destiné à réfléchir le rayonnement solaire incident (fig. 2.10.).

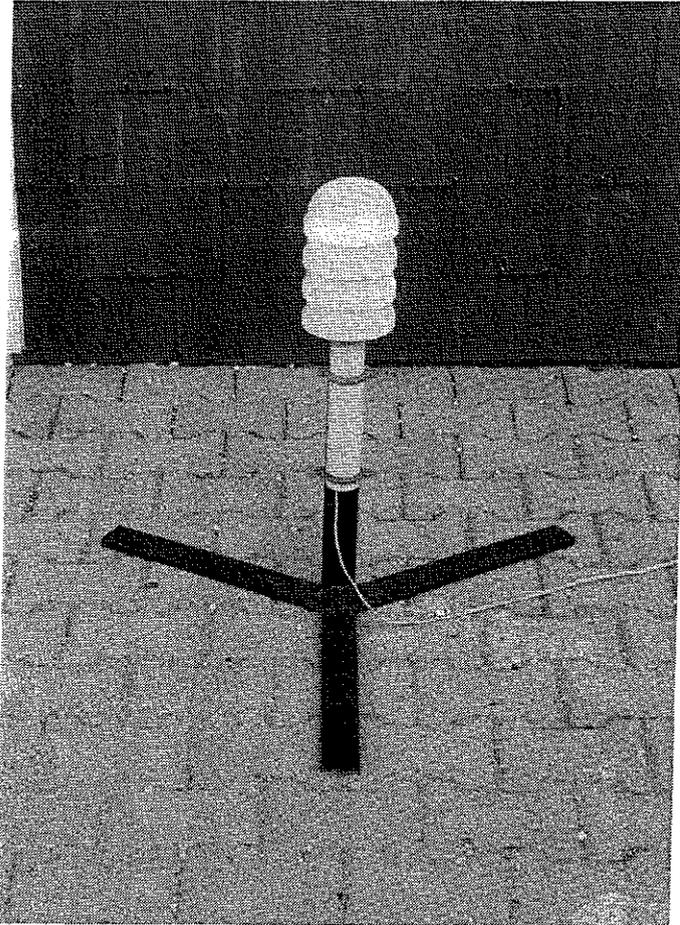


Fig. 2.10. Dispositif de mesure de la température extérieure réalisé à la FUL.

C. TEMPÉRATURE D'AIR INTÉRIEURE

La mesure de la température de l'air intérieure s'opère au moyen d'une thermistance du même type que ci-dessus, placée au centre d'un cylindre en aluminium poli d'une dizaine de centimètres de largeur et d'environ 5 cm de diamètre.

D. TEMPÉRATURE RÉSULTANTE

Cette température est définie comme une "moyenne" pondérée (avec des coefficients de pondération variables d'une situation à l'autre) entre la température de l'air et la température moyenne radiante (conditionnant l'émission infrarouge des parois). Pour la mesurer, nous avons fait usage d'une thermistance CTN placée au centre d'une balle de ping-pong blanche qui s'avère reproduire avec une précision valable l'interaction radiative entre un individu et son environnement (Opfergelt, 1983).

E. TEMPÉRATURE DE SURFACE

Pour mesurer la température de surface de certains murs, une thermistance de type CTN a été collée sur le mur en question et peinte d'une couleur semblable à celle du mur.

F. TEMPÉRATURE DE MUR

Pour accéder à la température à l'intérieur d'un mur, la technique suivante a été utilisée : forage d'un trou dans le mur jusqu'à la profondeur souhaitée, placement d'une thermistance enroulée de résine conductrice dans le fond du trou, rebouchage du trou au moyen de plâtre.

G. VITESSE DE L'AIR

Pour mesurer ou plutôt pour "obtenir une information" sur la vitesse de l'air dans les serres du bâtiment, un dispositif basé sur la technique du fil chaud a été utilisé. Ce dispositif est constitué de deux thermistances dont l'une est chauffée par effet Joule au moyen d'un courant électrique de puissance connue. L'écart de température qui s'établit entre les deux thermistances est relié, par une loi de calibration, à la vitesse de l'air :

$$\frac{P}{\Delta t} = 0.00117621 + 1.72824 \cdot 10^{-5} (V_{\text{air}} - 0.789)^{1.05} \quad (2.1)$$

avec

- P : Puissance dissipée par le courant électrique
- Δt : Ecart de température
- V_{air} : Vitesse de l'air

Cette loi de calibration résulte d'essais en soufflerie réalisés à l'Université de Liège. Une présentation détaillée du principe physique utilisé est fournie par den Ouden (1958).

H. ETAT D'OUVERTURE DES PORTES

La mesure de la résistance électrique au travers d'un simple interrupteur déclenché par l'ouverture de la porte permet d'obtenir une information précise sur l'état de la porte : porte fermée, interrupteur fermé, résistance nulle; porte ouverte, interrupteur ouvert, résistance infinie ou très grande.

I. FLUX THERMIQUE

De façon occasionnelle, le flux thermique a été mesuré sur certaines parois au moyen d'un thermofluxmètre.

J. CONSOMMATION DE GAZ ET D'ÉLECTRICITÉ

Pour ces variables, une lecture (visuelle) du compteur, en début et en fin de journée a permis d'obtenir une information globale.

K. CARTE THERMIQUE DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

La technologie de l'imagerie infrarouge permet d'obtenir une vue globale de la déperdition thermique (à la connaissance de l'émissivité près) du bâtiment (fig. 2.11).

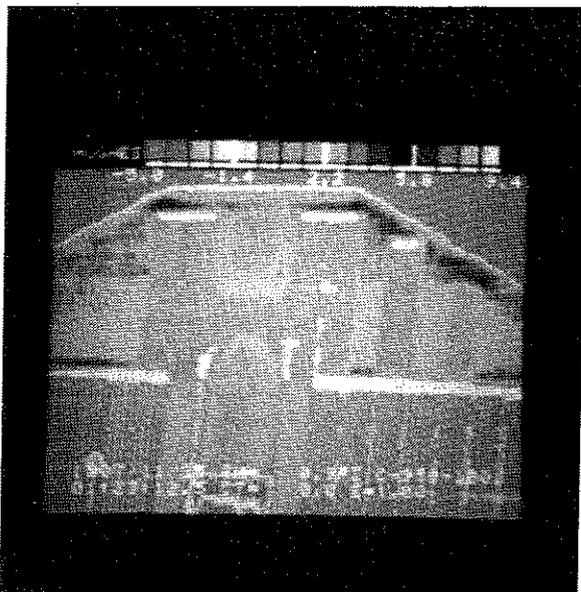


Fig. 2.11. Image infrarouge du bâtiment

L. NIVEAU D'INFILTRATION

Une estimation standardisée du niveau d'infiltration a été obtenue par la réalisation d'un test de pressurisation par le Centre Scientifique et Technique de la Construction (Wouters et al, 1988).

2.5.4. Description du système d'acquisition de données

L'ensemble des capteurs ont été raccordés à un système constitué d'un acquiiseur de données HP 3421A, d'une calculatrice HP 41 CV, d'une interface RS 232 permettant le stockage de données dans les EPROM d'un ordinateur de poche ("PSION Organiser"). Chaque semaine, ces mémoires ont été vidangées sur un ordinateur de type PC pour traitement ultérieur. La figure 2.12 représente l'ensemble du processus.

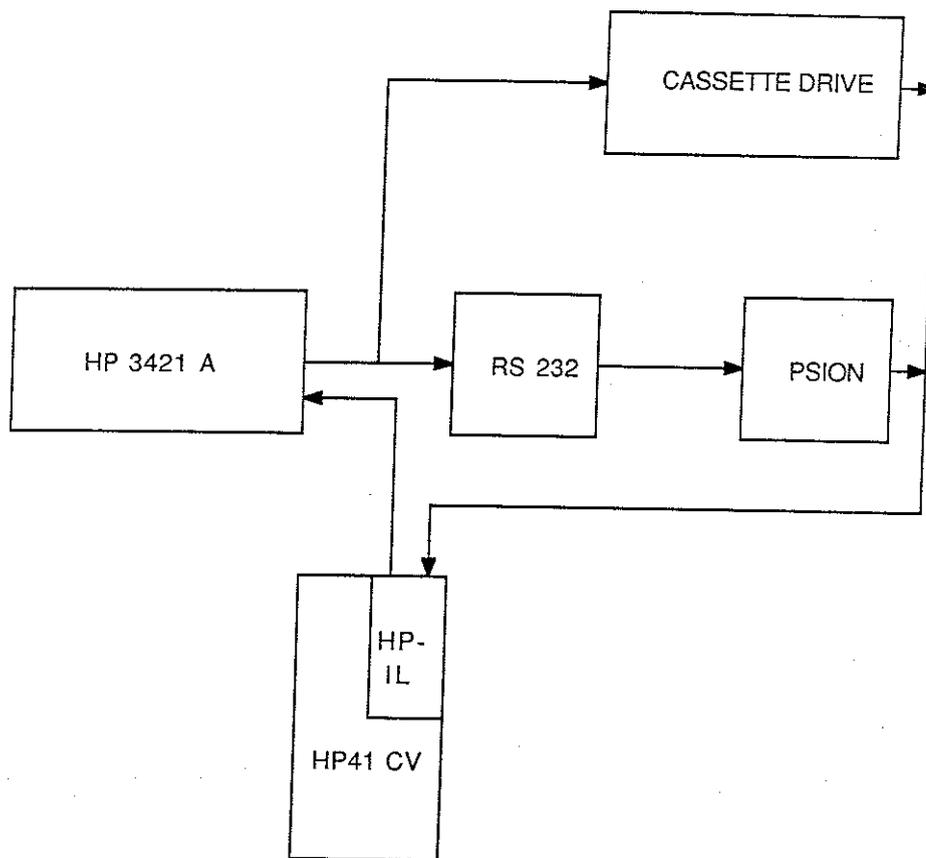


Fig. 2.12. Acquisition et transfert de données

2.5.5. Traitement des données

Une fois disponible sur un ordinateur, les données ont pu recevoir toutes les formes de traitement classique (Erhorn et al, 1991). Dans notre cas, ce traitement a revêtu trois aspects:

- un traitement graphique : normalisation des courbes d'évolution des variables mesurées dans un tableur (Lotus 1-2-3, Quattro Pro) ou un programme d'analyse des courbes;
- un traitement statistique : calcul des valeurs caractéristiques des grandeurs mesurées (moyennes, écart types, valeurs extrêmes), des distributions de fréquence, de la corrélation entre variables, des droites de régression;

- un traitement par l'analyse des systèmes : construction de modèles et identification des paramètres de ce modèle par algorithmes de moindres carrés ou Filtre de Kalman (logiciels IDSOFT, CYPROS). Le chapitre 4 donne plus d'information à ce sujet.

Quelle que soit la nature du traitement, celui-ci peut être considéré comme une extension du système de mesure et d'acquisition de données qui transforme les données brutes en des données représentant une information enrichie par rapport à la situation initiale.

2.6. PRINCIPAUX RÉSULTATS (André, 1990)

2.6.1. Consommation d'énergie

La table 5.2 montre la consommation d'énergie de chauffage pour les 6 premières années d'occupation du bâtiment:

Saison de chauffe	Consommation kWh	Consommation/m ² kWh/m ²
1986/1987	108587	163
1987/1988	99181	149
1988/1989	96198	144
1989/1990	97036	146
1990/1991	101496	152
1991/1992	117161	175
1992/1993	109902	165

Tableau 5.2. Consommation du bâtiment pour les 7 premières années d'occupation

Ces résultats peuvent paraître élevés pour un bâtiment de type solaire passif qui occasionne habituellement des consommations de l'ordre de 100 kWh/m². Les résultats de la première année sont probablement liés au séchage du bâtiment et à un hiver moins clément que les autres années. Le niveau élevé de la consommation énergétique est dû en partie à un contrôle défectueux du système de chauffage auxiliaire. Des mesures sur le système lui-même ont montré que la coupure nocturne et en week-end n'était pas effective, au moins pour un des deux circuits de distribution. Une autre explication des modestes performances a été fournie par un test de pressurisation réalisé par le CSTC: la toiture possède un très faible taux d'étanchéité à l'air par manque d'une couche protectrice et cela occasionne des taux de renouvellement d'air particulièrement élevés (Wouters et al, 1988). Enfin, le niveau élevé de la consommation énergétique est également à imputer à une trop faible contribution du mur de masse au chauffage des locaux situés en contact avec lui. Différentes raisons expliquent cela :

- Le mur est peint en blanc. Par conséquent, la plupart du rayonnement solaire est réfléchi à l'intérieur ou sur le plancher.
- Le mur est situé trop loin du vitrage: la toiture joue le rôle d'un écran lorsque le soleil est haut dans le ciel. (fig. 2.13.)

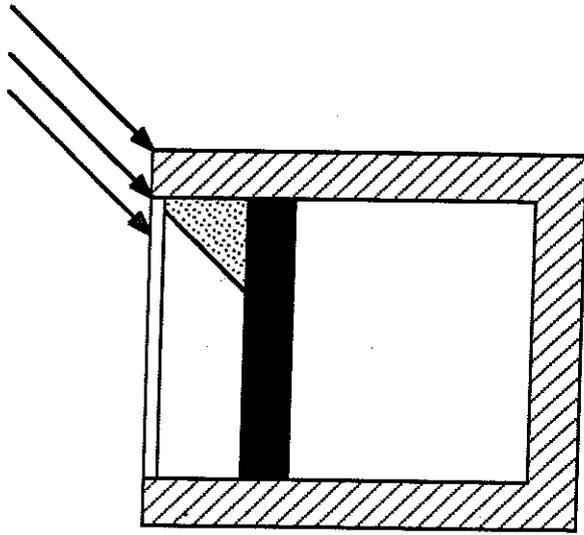


Fig. 2.13. Effet d'écran de la toiture

- La partie opaque de la façade (34%) fait écran au mur lorsque le soleil s'éloigne de l'azimut sud. (fig. 2.14.)

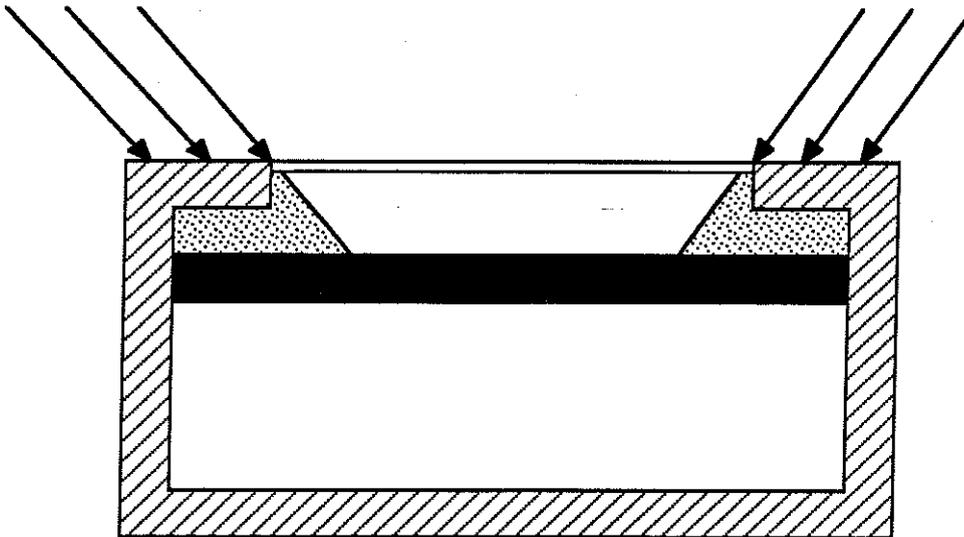


Fig. 2.14. Effet d'écran des parties opaques latérales

- Des conduits de ventilation sont situés dans les serres. Ils sont peints en couleur orange et absorbent plus de rayonnement solaire que le mur lui-même. De plus, ils font écran au mur. (fig. 2.15)



Fig. 2.15. Obstruction par les conduits de ventilation

2.6.2. Confort thermique

La température de l'air a été mesurée dans chaque zone du bâtiment. Les valeurs moyennes enregistrées et les déviations standard associées sont reprises à la table 5.3 et correspondent aux deux années de monitoring.

Zone	Température moyenne (K)	Déviatiion standard (K)
Auditoire	19.5	0.8
Hall central	21.5	2.3
Bureaux	21.7	1.5
Bureaux visiteurs	22.7	2.0
Salles de réunion	20.7	1.4

Tableau 5.3. Température moyenne et déviatiion standard pour différentes zones.

Cette table montre que les températures moyennes dans le bâtiment sont élevées (les moyennes reprennent à la fois les valeurs diurnes et les valeurs nocturnes). Les auditories apparaissent comme les locaux les plus frais du bâtiment à cause de la réduction des gains directs et de l'effet amortissant des murs de masse. Les zones directement ensoleillées sont soumises à des températures moyennes supérieures à 20°C accompagnées de déviations importantes autour de cette moyenne, dues à la fois aux gains solaires et à la coupure nocturne du chauffage. La tendance à la surchauffe peut être mise en évidence par le calcul des distributions fréquentielles de températures (fig. 2.16.).

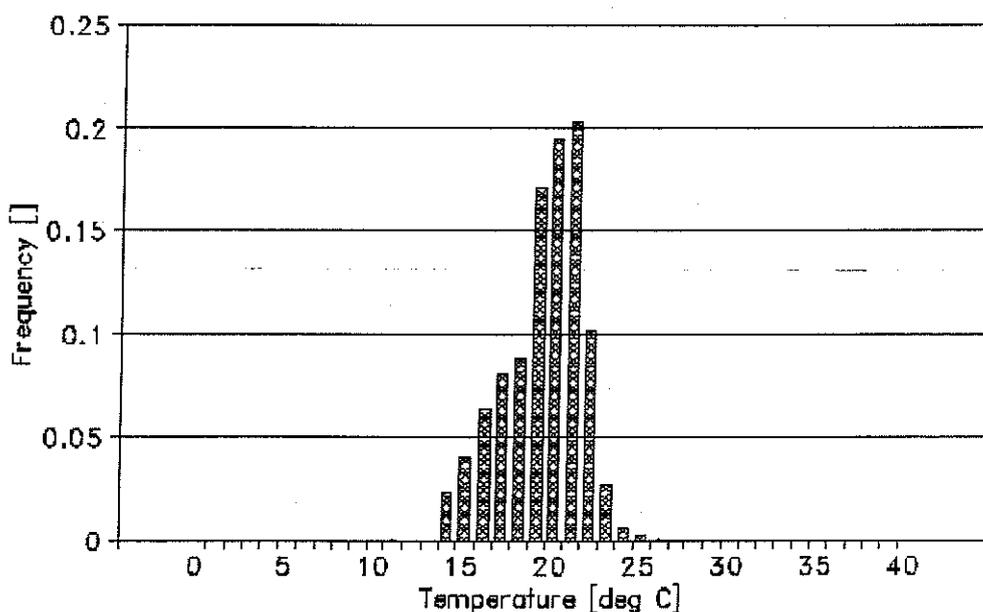


Fig. 2.16a. Distribution fréquentielle de la température dans la zone "Auditoire"

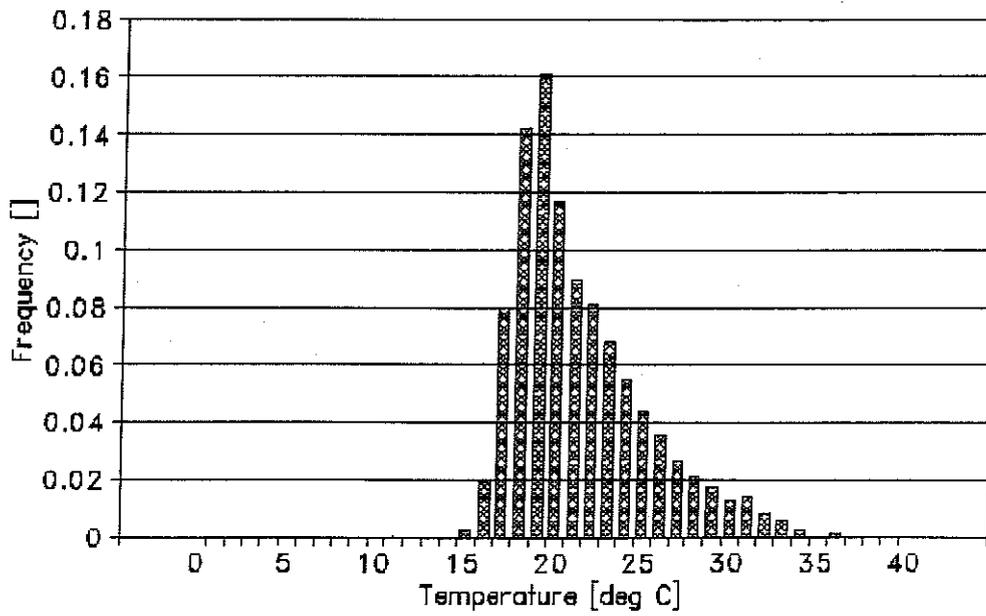


Fig. 2.16b. Distribution fréquentielle de la température dans la zone "Hall"

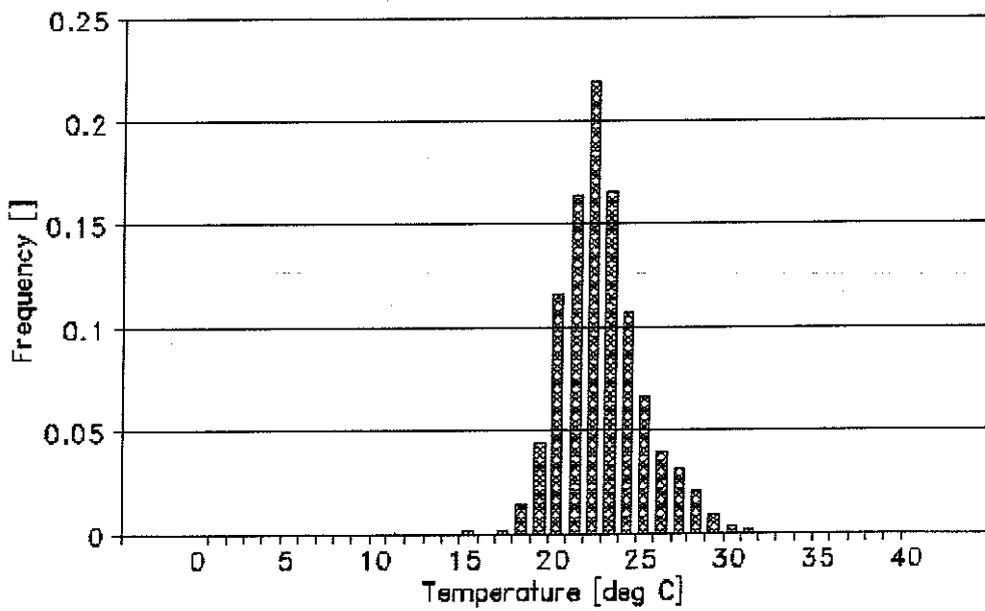


Fig. 2.16c. Distribution fréquentielle de la température dans la zone "Bureaux"

Les zones à gain indirect donnent lieu à des distributions centrées sur le point de consigne du système de chauffage avec un peu de sous-chauffe dans les auditorios (effet de la masse thermique) et un peu de surchauffe dans les bureaux (à cause du gain direct). Une série de dispositifs, de nature à réduire l'intensité des surchauffes dans les bureaux, sont disponibles mais peu ou mal utilisés: les volets extérieurs sont efficaces mais leur effet occultant est désagréable, les fenêtres de toiture sont rarement utilisés, le système de ventilation installé dans les bureaux est inefficace (débit trop faible) et, de plus, très bruyant.

Par ailleurs, une investigation postérieure de la problématique du confort thermique a mis en évidence les inconvénients majeurs de ce bâtiment en période estivale (André et al, 1993). La figure 2.17. montre la distribution du PMV ("Predicted Mean Vote") de la théorie de Fanger (Fanger, 1972) pour 4 locaux du bâtiment en septembre 1991. Ces résultats mettent en évidence la différence de comportement entre les locaux du rez-de-chaussée (Auditoire 121, hall d'entrée) et ceux de l'étage (Colson, 1992).

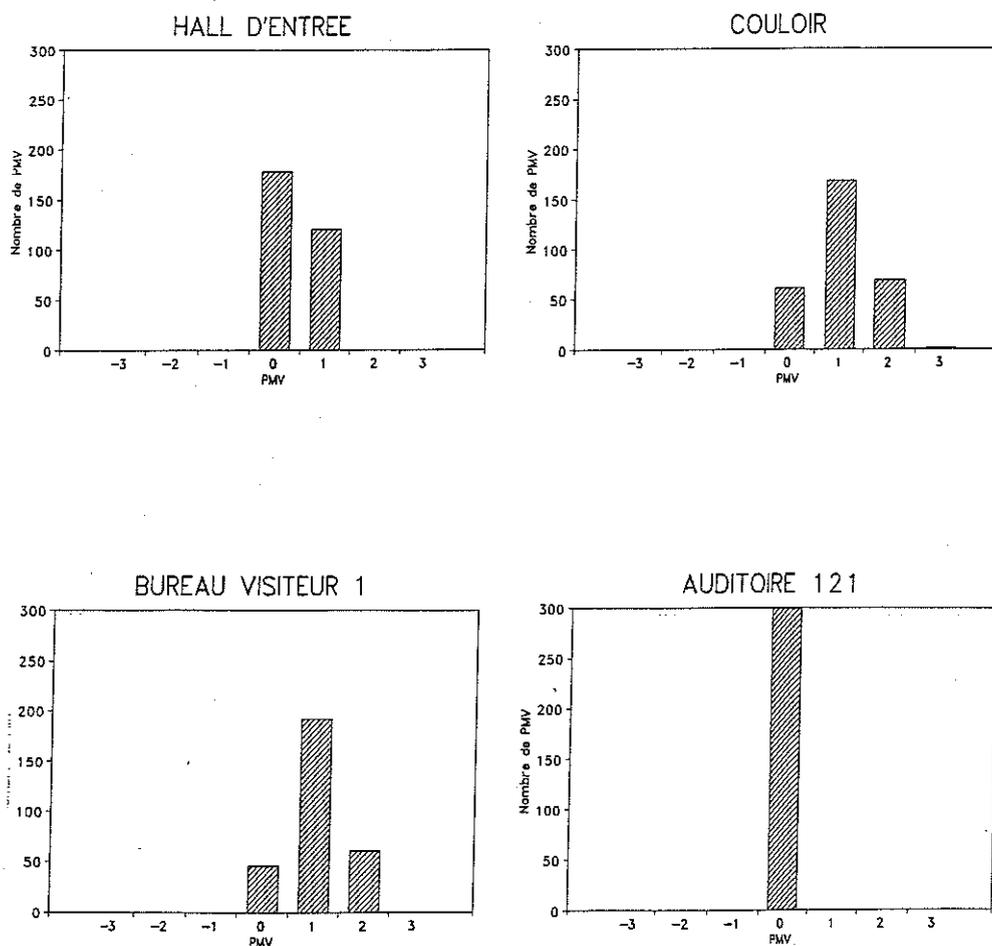


Fig. 2.17. Distribution du PMV en septembre 1991 dans 4 locaux du bâtiment.

2.6.3. Conclusions

Les mesures réalisées sur le bâtiment académique de la FUL ont mis en évidence un certain nombre d'imperfections tant au niveau de la conception que de l'utilisation du bâtiment. Ainsi, la stratégie solaire passive ne rencontre pas le succès espéré de par la contribution trop peu significative du mur de masse au chauffage des locaux: une bonne partie des gains solaires indirects sont perdus par le vitrage, par le mur, par les conduits de ventilation. Les gains directs occasionnent des surchauffes intolérables et les mesures prises pour les réduire ne se montrent pas très efficaces. Enfin, le fonctionnement du système de chauffage n'apparaît pas optimal.

Au rayon des satisfactions, le comportement estival de la masse thermique est à souligner. Les auditoriums apparaissent pratiquement insensibles au climat extérieur. La solution choisie pour assurer l'éclairage naturel des locaux apparaît également idéale parce qu'elle parvient à concilier les impératifs de la présence des murs et de la pénétration de la lumière.

Au terme de la procédure expérimentale, il est permis de se demander si deux années de mesures ininterrompues étaient nécessaires pour aboutir à ces conclusions. La réponse est probablement non dans la mesure où nombre de ces conclusions résultent de considérations essentiellement qualitatives où découlant d'observations ponctuelles. Toutefois, les mesures effectuées trouveront d'autres utilisations comme l'estimation de paramètres, la validation et la calibration de modèles qui nécessitent une quantité d'informations plus importante. Les chapitres 4 et 5 de ce travail présenteront des résultats en relation avec ces autres aspects des campagnes de mesures.

2.7. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

Comme signalé dans l'introduction à ce chapitre, la mesure revêt une importance fondamentale dans tous les problèmes liés à la réalité du terrain. Seule la mesure permet d'obtenir une information précise et objective sur les phénomènes qui ont lieu dans le système étudié. Ceci apparaît d'autant plus vrai pour les problèmes environnementaux que ceux-ci exhibent une très grande complexité en mettant en jeu des phénomènes de tous ordres : physiques, chimiques, biologiques, économiques, sociologiques, ... Par conséquent, la mesure apparaît comme le seul outil apte à aborder fondamentalement les différentes facettes d'un problème d'environnement. Ceci justifie la part très importante accordée à la problématique de la mesure dans toutes les situations environnementales : l'environnement se mesure avant toute autre action, modification ou gestion.

Sur le plan méthodologique, la mesure appliquée au contexte environnemental ne diffère pas de ce qui a été mis en évidence dans ce chapitre pour le cas particulier de l'analyse d'un bâtiment. Les étapes suivantes devront par conséquent, être entreprises :

1. Observation et compréhension du système étudié.
2. Définition des objectifs de la campagne des mesures.
3. Mise au point d'une méthodologie expérimentale.
4. Définition d'un plan de mesures et implémentation incluant le choix des points de mesure, des capteurs, du système d'acquisition.
5. Réalisation de la campagne des mesures.
6. Traitement des données.
7. Présentation des résultats traités.

Plus encore que pour d'autres systèmes, la phase de réflexion préalable apparaît fondamentale à cause de la complexité et de l'interdépendance des phénomènes mis en jeu. Elle permet en effet une économie de temps et réduit le coût d'instrumentation.

Cependant, l'approche d'un problème environnemental induit certaines particularités. Tout d'abord la nature multidisciplinaire implique une plus grande diversité des types de données à récolter (Nicolas, 1992) : l'expérimentation en environnement associera harmonieusement mesure, enquête, consultation de cartes ou autres documents, inventaires de faune ou flore. Cette diversité se répercute dans les échelles utilisées pour quantifier l'information : certaines variables s'expriment dans une échelle cardinale, d'autres dans une échelle ordinaire voire nominale. Elle se répercute également sur la précision (absolue ou relative) avec laquelle les différentes variables sont mesurées. Enfin, le traitement des données doit également tenir compte de l'hétérogénéité des données récoltées en utilisant des outils spécifiques tels que : l'analyse discriminante, les systèmes experts, l'estimation des paramètres, l'analyse multicritère, la théorie des nombres flous.

Enfin, les problèmes de nature environnementale, s'attachant à des situations essentiellement liées au monde des vivants, peuvent être abordés par une "technologie" également basée sur l'utilisation d'acteurs vivants. Ainsi, c'est l'absence de l'une ou l'autre espèce animale ou végétale qui va fournir une information sur la qualité des eaux d'une rivière tout comme la notion de "PMV" (voir 2.6.2) résulte d'une interprétation subjective d'individus placés dans certaines ambiances intérieures. En d'autres termes, le système mesuré agit comme instrument de mesure appliqué à lui-même. Ceci modifie évidemment fondamentalement le concept de mesure et d'expérimentation et ne peut manquer d'induire de nombreuses répercussions sur la mise en oeuvre d'un plan de mesures.

2.8. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

A partir de l'expérience réalisée pendant le projet IEA TASK XI, ce chapitre a montré l'importance fondamentale de l'observation et de la mesure dans l'appréhension d'un problème de prise de décision dans un contexte environnemental. Les différentes étapes associées à une démarche expérimentale cohérente doivent recevoir une attention particulière : observation du système, définition des objectifs, choix d'une méthodologie et d'un plan expérimental, exécution de la campagne de mesures et traitement des données. L'importance cruciale de la prise en compte de toutes étapes et de leur dépendance mutuelle apparaît encore renforcée dans un contexte environnemental à cause du caractère pluridisciplinaire de ce type de problème et de la diversité des échelles et, des données qui en résulte. Ceci implique l'utilisation d'outils de traitement spécifiques. L'objet de cette thèse s'inscrit d'ailleurs logiquement dans cette filière en abordant la phase ultime et postérieure du traitement des données, à savoir l'intégration dans un mécanisme décisionnel.

CHAPITRE 3.

MODÉLISATION

3.1. INTRODUCTION

Support de toute théorie, la modélisation revêt un caractère pratiquement aussi fondamental que la mesure. Alors que l'expérimentation a pour objet la collecte d'informations sur un certain système, la modélisation poursuit l'objectif de décrire ou représenter le fonctionnement de ce système. La complémentarité des deux approches apparaît d'emblée : il n'y a pas de modèle sans mesures et les mesures perdent une bonne partie de leur interprétabilité si un modèle ne leur est pas adjoint. Ainsi un modèle permettra-t-il d'extrapoler des informations à partir de la mesure, voire de calculer une variable non mesurable à partir d'autres grandeurs mesurées.

La problématique environnementale n'échappe pas à cette dualité. De nouveau les caractéristiques complexe et pluridisciplinaire d'un problème environnemental engendrent la nécessité d'associer de la façon la plus harmonieuse possible mesure et modèle afin d'aboutir à une meilleure compréhension, à une meilleure prédiction ou à un contrôle amélioré des systèmes analysés. Tels sont en effet les trois objectifs traditionnellement assignés à l'utilisation d'un modèle. Dans le domaine de l'environnement, la réalisation de l'un ou l'autre de ces objectifs peut présenter plus de difficultés que pour des systèmes "simples" bien définis. Pensons par exemple aux problèmes météorologiques pour lesquels les grands modèles de circulation s'avèrent totalement impuissants à effectuer la moindre prédiction fiable au delà d'un délai de quelques jours, et ce malgré la mise à disposition d'un réseau extrêmement dense de collecte de données. Que dire alors des "modèles" de l'évolution générale de la planète, aussi controversés que complexes, qui tentent d'indiquer des tendances en intégrant les aspects climatologique, physique, économique, démographique, écologique dans un ensemble mal défini de relations de cause à effet ! La taille des systèmes observés n'explique pas à elle seule l'imperfection des modèles. Les différentes "visions" de la structure de la matière à l'échelle atomique ont fait l'objet d'autant de modèles, tous imprécis, tous inexacts mais qui, tous, ont fait progresser la connaissance par leur confrontation à l'expérience. Ceci renforce leur caractère indispensable dans la plupart des situations.

Le présent chapitre s'attache à montrer l'objet d'une démarche de modélisation dans un contexte de prise de décision environnementale. La problématique sera illustrée par des développements de modèles effectués dans le cadre du projet IEA Task XI, spécialement pour un système solaire passif particulier : le mur de masse. Deux modèles seront proposés successivement : un modèle "simplifié" prenant en compte les phénomènes étudiés de façon globale et un modèle "complexe" détaillant le phénomène de la conduction dans les murs.

Ensuite, la généralisation montrera comment appliquer ce type de démarche à d'autres problèmes d'environnement où la nécessité d'un modèle se fait sentir.

3.2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLE

3.2.1. Généralités

A la base, les modèles se classifient en modèles conceptuels (ou phénoménologiques), physiques (ou empiriques) et mathématiques (ou analytiques). Pour illustrer ces notions, considérons un exemple de mécanique céleste (Eykhoff, 1974). Le modèle de mouvement des planètes de Ptolémée peut être considéré comme un modèle conceptuel. Il ne repose sur aucune observation. Le modèle de Copernic est un modèle physique parce qu'il explique les observations comme le résultat du mouvement relatif de l'observateur et de la planète observée. Enfin, la quantification apportée par les lois de Kepler constitue un modèle mathématique capable de servir pour la prédiction de l'évolution du système. La suite du chapitre se réduira à ce dernier type de modèle.

3.2.2. Modèles mathématiques

Un modèle mathématique définit les relations entre les variables physiques d'un système en termes de structures mathématiques telles que des équations algébriques, des équations différentielles ou des systèmes différentiels (Fasol et Jörgl, 1980). Les modèles mathématiques peuvent se voir classifiés suivant différents critères.

- Modèles théoriques et modèles expérimentaux : les premiers sont déduits à partir des lois physiques fondamentales. Les seconds sont induits par l'expérience. De nombreux modèles associent les deux approches.
- Modèles statiques et modèles dynamiques. Les premiers supposent une réponse instantanée du système alors que les seconds prennent en compte l'inertie du système.
- Modèles à paramètres distribués ou à paramètres localisés. Les premiers sont représentés par des équations aux dérivées partielles de type elliptique, hyperbolique ou parabolique. Les seconds sont décrits par des équations différentielles ordinaires linéaires ou non linéaires.
- Modèles continus ou discrets. Les modèles discrets sont représentés par des équations aux différences, obtenus par discrétisation des équations différentielles ou aux dérivées partielles de départ, qui constituent le modèle continu.

- Modèles déterministes ou stochastiques. Au contraire des premiers, les seconds font intervenir des grandeurs aléatoires, caractérisées par des valeurs statistiques et des lois de probabilité.
- Modèles paramétriques ou non paramétriques : les premiers s'expriment sous la forme d'équations décrivant le comportement du système alors que les seconds sont constitués par une réponse à une certaine sollicitation (réponse indicielle ou impulsionnelle).
- Modèles d'état ou modèles "entrée-sortie" : les premiers décrivent le fonctionnement intérieur du système par l'intermédiaire de ses variables d'état; les seconds "court-circuitent" ces variables internes et représentent la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie du modèle.
- Modèles de connaissance ou modèles de représentation (ou de conduite). Les premiers partent d'une analyse et d'une représentation des phénomènes physiques, chimiques, biologiques, économiques, écologiques entrant en jeu dans le système étudié. La combinaison de ces équations conduit à un modèle dont les coefficients correspondent à des paramètres physiques du système : conductivité thermique, résistance électrique, vitesse de réaction chimique, ...
Les modèles de représentation ne postulent aucune dépendance physique entre les variables prises en compte. Ils s'attachent davantage à établir des relations statistiques (corrélations) entre ces variables et qui correspondent à l'observation. Cette approche convient particulièrement pour des systèmes très complexes (en particulier les systèmes environnementaux) et conduit à des modèles de type "boîte noire" : le fonctionnement interne en est invisible de l'extérieur.
Entre ces deux extrêmes existe toute la gamme de situations intermédiaires ("boîtes grises") dans lesquelles le modélisateur associe harmonieusement une approche "physique" et une approche "statistique".
- Modèles linéaires et modèles non linéaires : les premiers sont représentés mathématiquement par des équations algébriques, différentielles ou aux dérivées partielles linéaires traduisant l'applicabilité du Principe de Superposition à ce type de système. Les seconds introduisent les non linéarités qui existent dans la plupart des systèmes physiques. La simplification apportée par la considération de modèles linéaires rend la linéarisation très fréquente, par exemple par la troncature d'un développement en série de Taylor au 1^{er} ordre.

3.2.3. Modèles mathématiques en physique du bâtiment

La physique du bâtiment, en particulier la thermique, a donné lieu à une activité intense dans le domaine de la modélisation. Celle-ci repose fondamentalement sur l'existence de lois phénoménologiques régissant les différentes formes de transfert thermique: conduction,

convection et rayonnement. A partir de ces lois, d'origine empirique, des modèles de complexité très variable, ont été développés. Leur classification peut s'effectuer suivant les critères énumérés ci-dessus. Toutefois, le langage courant du spécialiste en modèles de bâtiment ajoutera une distinction, parfois très subjective, entre les modèles "simplifiés" et les modèles "complets" ou "complexes" ou encore "détaillés". La simplification des premiers réside essentiellement dans le fait qu'ils regroupent différents transferts, différentes variables, différents paramètres dans des concepts "agrégés". Ils ont fait l'objet de travaux importants en Belgique (Laret, 1980), (Ngendakumana, 1988) et en France (François, 1991). La complexité des seconds envisage tout ou partie de ces concepts de façon distincte. Elle apparaît indispensable pour aborder par exemple des problèmes de mouvements d'air par des méthodes de la mécanique des fluides (Jones et Whittle, 1992). Ces deux catégories apparaissent évidemment extrêmement floues et donnent lieu à toute une gamme de nuances. Les deux paragraphes suivants vont illustrer ces deux niveaux de modélisation par des exemples concrets.

3.3. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE SIMPLIFIÉ POUR LE SYSTÈME SOLAIRE PASSIF "MUR DE MASSE" (ANDRÉ, 1988)

3.3.1. Introduction

Dans le cadre du projet IEA Task XI (1.2.1.1.), l'étude du bâtiment académique de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise se devait d'investiguer de manière approfondie le système de chauffage solaire passif du bâtiment, à savoir le mur de masse. Très vite, il est apparu indispensable de disposer d'un modèle mathématique simple mais efficace du système de façon à permettre une identification paramétrique du fonctionnement du composant et l'insertion d'une description adéquate du système dans un logiciel de simulation. C'est ainsi qu'à été mis en chantier le développement d'un tel modèle. La suite de ce paragraphe va montrer la démarche effectuée, depuis l'observation du système jusqu'à sa mise en équations.

3.3.2. Description du système

Le mur de masse est un composant solaire passif dont le but est de réaliser les fonctions de captation et de stockage de l'énergie solaire. Par cette double fonction, le mur de masse se rapproche des collecteurs solaires (à air ou à eau) en présentant successivement (fig. 3.1.):

- 1 paroi vitrée (en général double vitrage)
- 1 espace tampon dont les dimensions peuvent aller de quelques cm à 1 m et qui, dans ce cas limite, peut être considéré comme une serre accolée au bâtiment

- 1 paroi accumulatrice dont le but est de réaliser une absorption sélective du rayonnement solaire et infrarouge et de constituer le siège du stockage de l'énergie thermique.

Le mur de masse se distingue du mur de Trombe par le fait qu'aucune circulation d'air n'est assurée autour de la paroi accumulatrice et que, de ce fait, le transfert de chaleur de part et d'autre de cette paroi se réalise uniquement par conduction à travers le matériau de stockage.

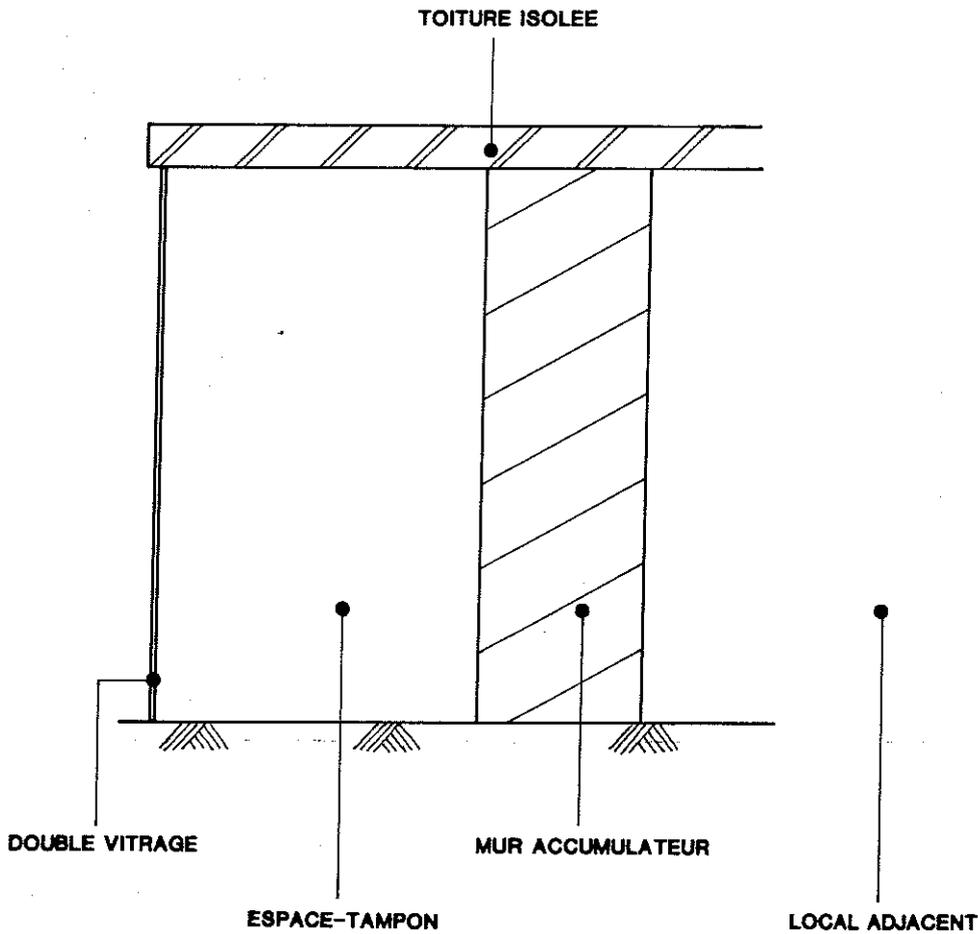


Fig. 3.1. Vue générale du système "Mur de masse"

3.3.3. Les phénomènes physiques influençant le système

Une analyse détaillée des phénomènes physiques apparaissant dans le système "Mur de masse" révèle les faits suivants :

1. Le rayonnement solaire (UV, visible, infrarouge proche) est partiellement
 - réfléchi par le vitrage : cette énergie est perdue
 - absorbé par le vitrage : cette énergie se propage à travers le vitrage par conduction; le transfert est gouverné par le gradient thermique de part et d'autre de la paroi
 - transmis par le vitrage : cette énergie pénètre directement dans l'espace tampon
2. Le rayonnement solaire transmis par le vitrage traverse l'espace tampon et interagit avec la paroi accumulatrice
 - une partie est absorbée par la paroi et chauffe celle-ci
 - une autre partie est réfléchie par cette paroi et est renvoyée dans l'espace tampon, voire à l'extérieur du bâtiment
3. Le rayonnement solaire absorbé par le vitrage (à l'extérieur ou à l'intérieur) chauffe celui-ci et augmente l'intensité de l'émission infrarouge du vitrage. Cette émission se fait vers la paroi accumulatrice et vers l'environnement extérieur, en particulier la voûte céleste.
4. Le rayonnement solaire absorbé par la paroi accumulatrice augmente la température de cette paroi et l'intensité de son émission infrarouge. Le flux de chaleur charge le matériau de stockage et s'écoule dans la paroi.
5. Le rayonnement infrarouge émis par le vitrage (côté intérieur) et par la paroi accumulatrice est piégé à l'intérieur de l'espace tampon. Il se propage alors par un jeu d'absorptions et de réflexions successives dans l'espace tampon (composante essentielle) et contribue à augmenter la température de surface intérieure des deux parois, ce qui rend le phénomène cumulatif, puisque l'augmentation de température provoque (suivant une loi de puissance 4) une augmentation de l'énergie rayonnée sous forme infrarouge.

6. Par convection, l'air de l'espace tampon se réchauffe au contact des deux parois émettrices. Ce faisant, s'introduit un phénomène de mouvement ascensionnel de l'air chaud qui, intuitivement, peut être renforcé par un gradient thermique le long des parois
7. Si les matériaux constituant les deux parois (vitrage et accumulateur) ont des propriétés radiatives (optiques) différentes, ce qui est généralement le cas, surtout dans la partie solaire du spectre, les deux parois vont présenter des températures de surface différentes avec comme conséquence, un couplage convectif déséquilibré de part et d'autre de l'espace tampon qui entraîne une thermo circulation de l'air dans l'espace tampon. Intuitivement, ce phénomène risque d'être accentué par
 - une différence d'émissivité de deux parois
 - un éloignement plus grand des parois

3.3.4. Les paramètres du système

L'analyse détaillée des phénomènes physiques qui entrent en jeu permet de dégager les paramètres qui doivent intervenir dans une modélisation du système. Signalons à ce stade que la nomenclature proposée à la fin de ce texte résume la signification des différents symboles mathématiques utilisés.

1. Les propriétés optiques du vitrage gouvernent la pénétration et aussi la sortie de l'énergie solaire incidente :
 - REFLECTANCE (ρ_{ve})
 - ABSORPTANCE (α_{ve})
 - TRANSMITTANCE (τ_v)

D'après la loi de Kirchoff, on peut poser : $\alpha_{ve} + \tau_v + \rho_{ve} = 1$ d'où seulement deux de ces paramètres sont indépendants.

2. Les propriétés optiques de la paroi accumulatrice gouvernent l'absorption de l'énergie solaire par cette paroi :
 - REFLECTANCE (ρ_{w_0})
 - ABSORPTANCE (α_{w_0})

3. Les propriétés thermiques du vitrage gouvernent l'évolution du flux de chaleur à travers la paroi vitrée :

- CAPACITÉ THERMIQUE $(\rho C_p)_v$
- CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (λ_v) ou COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE (U_v)
- COEFFICIENTS D'ÉCHANGE CONVECTIF EXTERIEUR (h_{ve}) ET INTERIEUR (h_{vi})

4. Les propriétés thermiques du matériau stockeur gouvernent l'évolution du flux de chaleur à travers la paroi accumulative (l'indice i désigne une tranche de matière)

- CAPACITÉ THERMIQUE $(\rho c_p)_{w_i}$
- CONDUCTIVITÉ THERMIQUE $(\lambda)_{w_i}$

5. Les propriétés radiatives du vitrage et de la paroi accumulative gouvernent l'intensité de l'émission infrarouge associée à chacune des deux parois :

- ÉMISSIVITÉ ϵ_{vi} et ϵ_{w_0}
- ABSORPTIVITÉ α_{vi}^{Lw} et $\alpha_{w_0}^{Lw}$
- RÉFLECTIVITÉ ρ_{vi}^{Lw} et $\rho_{w_0}^{Lw}$

Par analogie avec un corps noir, on peut poser $\alpha^{Lw} = \epsilon$ et par conséquent, $\rho^{Lw} = 1 - \alpha^{Lw} - \epsilon = 1 - 2\epsilon$.

6. L'échauffement de la masse d'air est gouverné par l'intensité de l'échange par convection entre l'air et les parois. La quantité d'énergie accumule dans l'espace tampon est liée à la capacité calorifique de l'air. Le transfert direct d'énergie par conduction dans le volume d'air peut probablement être négligé en regard des phénomènes convectifs et surtout radiatifs et par suite de la faible conductivité thermique de l'air sec. Nous retiendrons donc les paramètres :

- CAPACITÉ CALORIFIQUE $(\rho c_p)_a$
- COEFFICIENT D'ÉCHANGE CONVECTIF (h_{vi})
 (h_{w_0})

7. Les différentes surfaces et les volumes mis en jeu conditionnent les flux de chaleur et les énergies mobilisées par le système.

Interviennent dès lors les surfaces :

- A_{v_e} : vitrage extérieur
- A_{v_i} : vitrage intérieur
- A_{w_i} : mur accumulateur

et le volume

- V_a : espace-tampon

Les échanges radiatifs sont, quant à eux, conditionnés par la façon dont les différentes parois "se voient", propriété exprimée par les facteurs de forme :

- $F_{v_e, sky}$: vitrage extérieur, ciel
- F_{v_i, w_0} : vitrage intérieur, paroi intérieure du mur
- $F_{w_{n+1}, walls}$: paroi extérieure du mur, paroi du local adjacent

3.3.5. Conditions aux limites agissant sur le système

Les conditions aux limites suivantes agissent sur le système :

- Ensoleillement global S
- Température extérieure T_{ext}
- Température du local situé à l'arrière de la paroi accumulatrice T_{room}
- Température du sol T_{ground}
- Température du ciel T_{sky}
- Température des parois du local adjacent T_{walls}

Elles correspondent aux conditions météorologiques et aux températures caractérisant les locaux adjacents au mur de masse. La figure 3.2. représente schématiquement l'influence de ces conditions aux limites ainsi que le type de transfert thermique concerné.

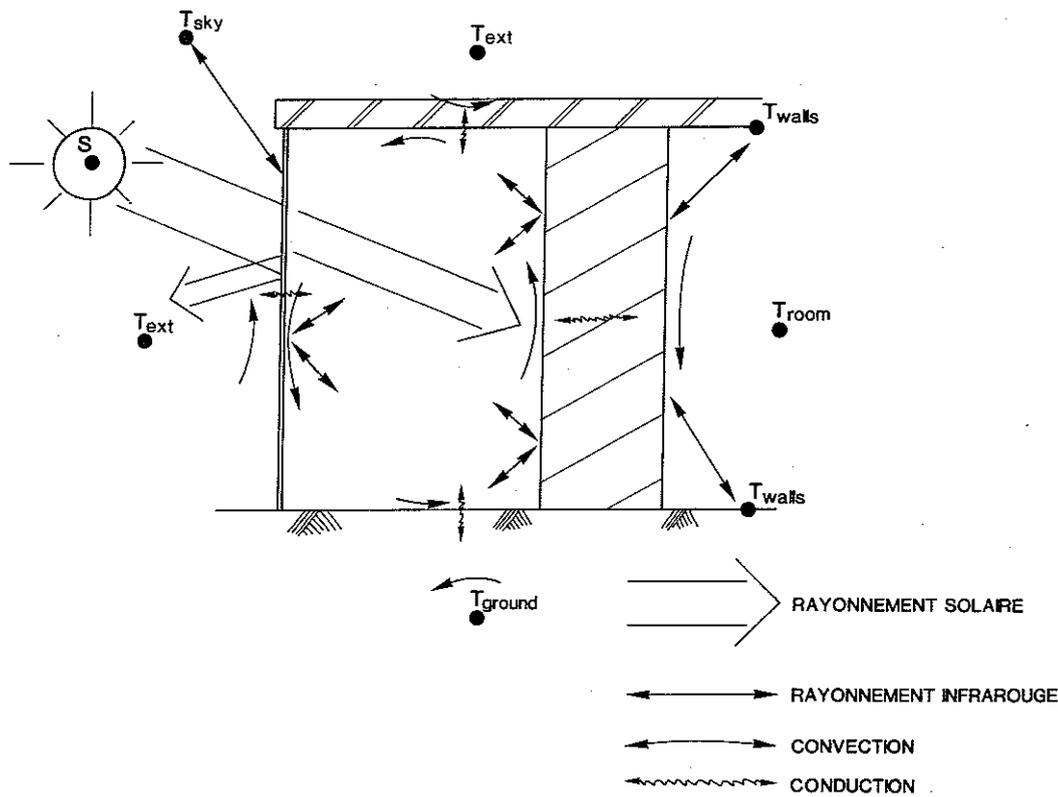


Fig. 3.2. Conditions aux limites du système "Mur de masse". Les potentiels ont été désignés par leur température absolue

3.3.6. Modélisation mathématique nodale du système

En utilisant une formulation basée sur la méthode nodale (aggrégation de matière par double intégration spatiale), tenant compte des hypothèses liées aux phénomènes physiques exprimés ci-dessus et des conditions aux limites énoncées au paragraphe précédent, nous pouvons élaborer le modèle mathématique suivant :

Nous pouvons, au sein du système, considérer les noeuds suivants :

1. 1 noeud représentant la surface extérieure de la paroi vitrée
2. 1 noeud représentant la surface intérieure de la paroi vitrée
3. 1 noeud représentant l'espace tampon
4. 1 noeud représentant la surface intérieure de la paroi accumulative

- 5,5 + n-1 n noeuds représentant la paroi accumulatrice (le nombre de noeuds est lié à la précision souhaitée pour la modélisation)
 5 + n-1 1 noeud représentant la surface extérieure de la paroi accumulatrice

Compte tenu de la faible masse affectée aux noeuds 1 et 2, nous pouvons négliger la capacité thermique de ceux-ci. En exprimant les phénomènes physiques du paragraphe 3.3.3 au moyen des lois habituelles et en utilisant les paramètres énumérés au paragraphe 3.3.4 (voir également la nomenclature), nous aboutissons aux équations suivantes :

Noeud 1 : Surface extérieure du vitrage

$$0 = A_{ve} [\alpha_{ve} \cdot F_g(\tau) S_H + h_{ve} \cdot (t_{ext} - t_{ve}) - U_v (t_{ve} - t_{vi}) - \epsilon_{ve} \cdot \epsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot F_{ve, sky} \cdot (T_{ve}^4 - T_{sky}^4)] \quad (3.1)$$

soit, en linéarisant les échanges radiatifs dans l'infrarouge de grande longueur d'onde et en divisant par A_{ve}

$$0 = \alpha_{ve} S_H F_g(\tau) + h_{ve} (t_{ext} - t_{ve}) - U_v (t_{ve} - t_{vi}) - \epsilon_{ve} \cdot \epsilon_{sky} \cdot \sigma F'_{ve, sky} (t_{ve} - t_{sky})$$

$$\text{avec } F'_{ve, sky} = F_{ve, sky} (T_{ve} + T_{sky})(T_{ve}^2 + T_{sky}^2) = F_{ve, sky} 4T_m^3$$

où T_m est une température moyenne entre T_{ve} et T_{sky} (Roulet, 1987)

Noeud 2 : Surface intérieure du vitrage

$$0 = A_{vi} [\alpha_{vi} (1 - \alpha_{ve} - \rho_{ve}) F_g(\tau) S_H - U_v (t_{vi} - t_{ve}) - h_{vi} (t_{vi} - t_a) - \epsilon_{vi} \epsilon_{w_0} \sigma F_{vi, w_0} (T_{vi}^4 - T_{w_0}^4)] \quad (3.2)$$

soit, en linéarisant les échanges radiatifs dans la zone infrarouge, grande longueur d'onde, du spectre et en divisant par A_{vi}

$$0 = \alpha_{vi} (1 - \alpha_{ve} - \rho_{ve}) F_g(\tau) S_H + U_v (t_{vi} - t_{ve}) - h_{vi} (t_{vi} - t_a) - \epsilon_{w_0} \epsilon_{vi} \sigma F'_{vi, w_0} (t_{vi} - t_{w_0})$$

avec, pour F'_{vi, w_0} , une définition similaire à celle de $F'_{ve, sky}$

Noeud 3 : Masse d'air de l'espace-tampon

$$V_a (\rho c_p)_a \frac{dt_a}{dt} = A_{vi} h_{vi} (t_{vi} - t_a) - A_{w_0} h_{w_0} (t_a - t_{w_0}) - (UA)_{ground} (t_a - t_{ground}) - (UA)_{roof} (t_a - t_{ext}) \quad (3.3)$$

Le milieu est considéré comme transparent vis-à-vis des échanges radiatifs.

Noeud 4 : Surface du mur de masse, côté serre

$$0 = A_{w_0} [\alpha_{w_0} \tau_{ve} F_g(\tau) S_H + h_{w_0} (t_a - t_{w_0}) - \frac{\lambda_{w_0}}{e_{w_0}} (t_{w_0} - t_{w_1}) - F_{w_0,vi}^i \sigma \epsilon_{w_0} \epsilon_{vi} (T_{w_0}^4 - T_{vi}^4)] \quad (3.4)$$

Pour les mêmes raisons que ci-dessus, nous pouvons également négliger la capacité thermique associée à cette couche superficielle.

Linéarisant les échanges radiatifs dans l'infrarouge de grande longueur d'onde et divisant par A_{w_0} , nous obtenons :

$$0 = \alpha_{w_0} \tau_{ve} F_g(\tau) S_H + h_{w_0} (t_a - t_{w_0}) - \frac{\lambda_{w_0}}{e_{w_0}} (t_{w_0} - t_{w_1}) - F_{w_0,vi}^i \sigma \epsilon_{w_0} \epsilon_{vi} (t_{w_0} - t_{vi})$$

avec, pour $F_{w_0,vi}^i$, une définition similaire à celle de $F_{ve,sky}^i$

Noeud 5 ... 5 + i, 5 + n-1 : Masse intérieure de la paroi accumulatrice (où n est le nombre de noeuds choisi pour la discrétisation du mur de masse)

Tous ces noeuds sont identiques et sont uniquement influencés par la conduction à travers la paroi accumulatrice.

Pour le noeud 5 + i ($0 \leq i < n$)

$$V_{w_i} (\rho c_p)_{w_i} \frac{dt_{w_i}}{d\tau} = A_{w_{i-1}} \left[\frac{\lambda_{w_{i-1}}}{e_{w_{i-1}}} (t_{w_i} - t_{w_{i-1}}) \right] - A_{w_i} \left[\frac{\lambda_{w_i}}{e_{w_i}} (t_{w_{i+1}} - t_{w_i}) \right] \quad (3.5)$$

Noeud 5 + n : Surface du mur de masse, côté local adjacent

$$0 = A_{w_{n+1}} \left[\frac{\lambda_{w_{n+1}}}{e_{w_{n+1}}} (t_{w_{n+1}} - t_{w_n}) - h_{w_{n+1}} (t_{w_{n+1}} - t_{room}) - \varepsilon_{w_{n+1}} \varepsilon_{walls} \sigma F_{w_{n+1}, walls} (T_{w_{n+1}}^4 - T_{walls}^4) \right] \quad (3.6)$$

En linéarisant les échanges radiatifs dans l'infrarouge de grande longueur d'onde et en divisant par $A_{w_{n+1}}$, nous obtenons :

$$0 = h_{w_{n+1}} (t_{room} - t_{w_{n+1}}) - \varepsilon_{w_{n+1}} \varepsilon_{walls} \sigma F'_{w_{n+1}, walls} (t_{w_{n+1}} - t_{walls}) + \frac{\lambda_{n+1}}{e_{n+1}} (t_{w_{n+1}} - t_{w_n})$$

avec, pour $F'_{w_{n+1}, walls}$, une définition similaire à celle de $F'_{ve, sky}$

En rassemblant les différentes équations correspondant aux différents noeuds du système, nous obtenons le modèle mathématique complet du système passif "mur de masse". Il s'agit d'un ensemble d'équations différentielles linéaires du premier ordre pour les différents noeuds capacitifs et d'équations algébriques pour les noeuds où sont censés ne se produire que des phénomènes de transfert instantanés ou, à tout le moins, caractérisés par des constantes de temps petites en regard de l'inertie totale du système, liée aux structures capacitives.

De la même façon, la connexion bout-à-bout, des différents réseaux nodaux correspondant aux noeuds successifs permet d'établir le réseau nodal global du système passif "mur de masse". Ce schéma représente les flux d'énergie se produisant dans le système, les noeuds entre lesquels se déroulent ces échanges et les conditions aux limites agissant sur le système (fig. 3.3).

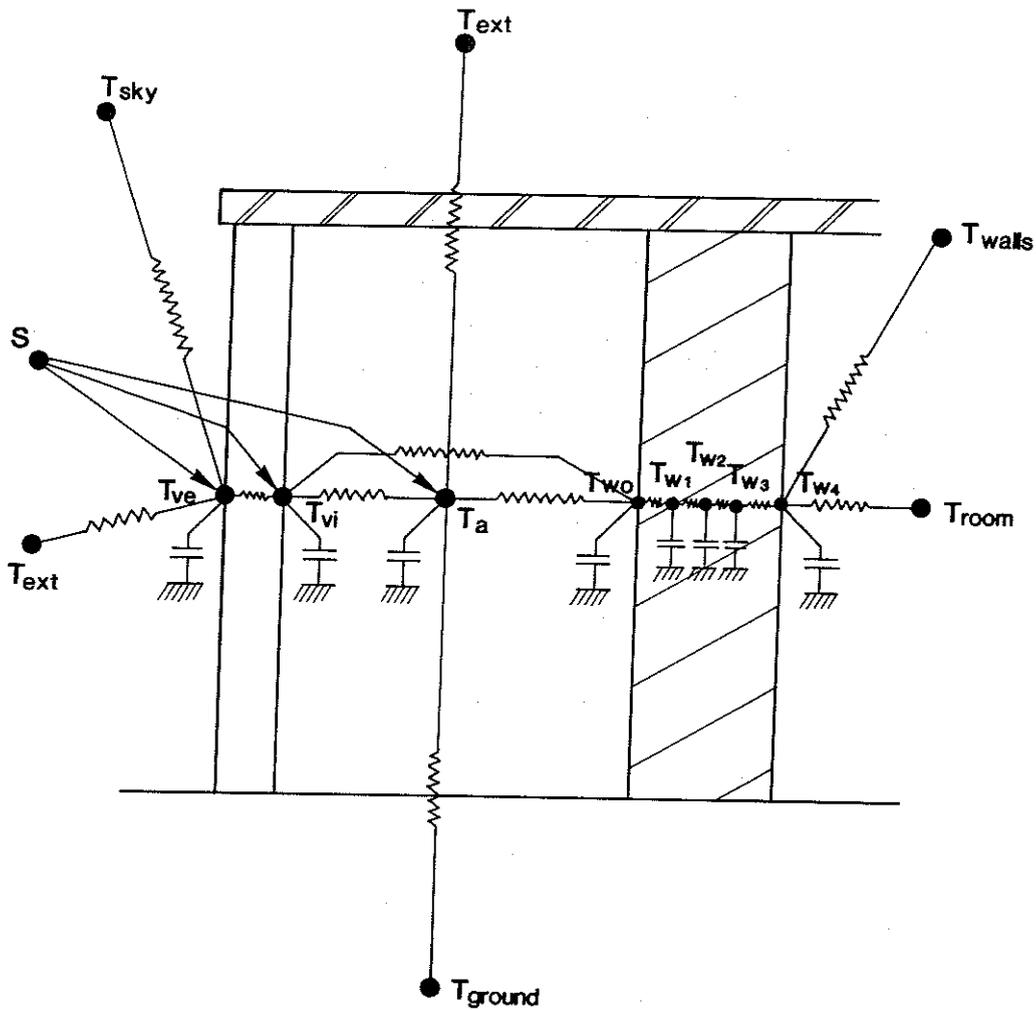


Fig. 3.3. Modèle nodal global du mur de masse

3.3.7. Utilisations du modèle développé

Une fois conçu et développé, le modèle recevra essentiellement deux utilisations. Tout d'abord, il servira de support à une procédure d'identification de système dont l'objectif est d'aboutir à une estimation de certains paramètres du système dans la configuration particulière du bâtiment de la FUL. Cette approche est présentée au chapitre 4. Par ailleurs, le modèle servira à un objectif de simulation. Pour ce faire, le modèle développé ci-dessus sera implémenté en tant que sous-programme d'un logiciel de simulation existant, en l'occurrence le programme TRNSYS (University of Madison, 1990). Ce travail est présenté au chapitre 5.

3.4. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE COMPLEXE POUR LE MUR ACCUMULATEUR DU SYSTÈME SOLAIRE PASSIF "MUR DE MASSE"

3.4.1. Introduction

Le modèle développé au paragraphe précédent pouvait être considéré comme simplifié dans la mesure où il réalisait une double intégration spatiale des phénomènes de transfert thermique, par essence tridimensionnels, de façon à aboutir à une formulation unidimensionnelle, spécialement pour le traitement de la conduction dans les murs. Il s'agit d'une hypothèse extrêmement courante dans la plupart des modèles décrivant mathématiquement le comportement thermique des bâtiments. La configuration particulière des murs accumulateurs du bâtiment académique de la FUL remet toutefois en cause la validité de cette hypothèse. Les murs accumulateurs se présentent en effet (fig. 3.4) comme une succession de profilés dont la forme affecte celle d'un "L" reliés entre eux par des vitrages intérieurs.

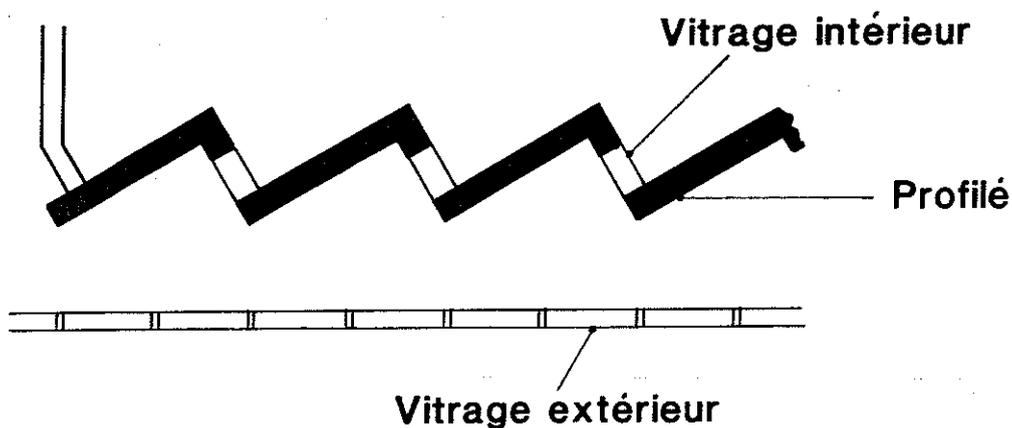


Fig. 3.4. Coupe à travers les murs accumulateurs du bâtiment académique de la FUL

Ce type de géométrie engendre des effets de bord assez prononcés et susceptibles de modifier la répartition du champ de température et des lignes de flux thermiques. Afin de mesurer l'amplitude de ce phénomène et d'infirmer ou de confirmer la nature uni-dimensionnelle du flux de chaleur à travers ces murs, il a été décidé de développer un modèle bi-dimensionnel traitant uniquement le problème de la conduction à travers le mur.

3.4.2. Hypothèses de la modélisation

Avant d'aborder la modélisation proprement dite, les hypothèses suivantes sont formulées :

- la conduction s'effectue de manière bi-dimensionnelle
- les propriétés du matériau sont homogène et isotrope (conductivité thermique, masse volumique, capacité thermique)
- le flux de chaleur est régi par la loi de Fourier

3.4.3. Développement du modèle

En toute généralité, la loi phénoménologique de Fourier exprimant la relation entre la densité de flux de chaleur et le gradient de température en un point donné d'un matériau s'écrit :

$$\underline{\phi}(x, y, z, \tau) = - \underline{\Lambda}(x, y, z) \underline{\text{grad}} t(x, y, z, \tau) \quad (3.7)$$

où $\underline{\Lambda}$ est un tenseur du second ordre dont la composante (i,j) traduit la conductivité dans la direction i causée par un gradient dans la direction j. Pour un matériau homogène et isotrope, le tenseur se réduit à une constante λ , la conductivité thermique du milieu, et la loi de Fourier peut se réécrire:

$$\underline{\phi}(x, y, z, \tau) = - \lambda \underline{\text{grad}} t(x, y, z, \tau) \quad (3.8)$$

Pour un transfert bi-dimensionnel, la loi de Fourier devient :

$$\underline{\phi}(x, y, \tau) = - \lambda \underline{\text{grad}} t(x, y, \tau) \quad (3.9)$$

Par ailleurs, la diffusion de la chaleur dans un matériau doit satisfaire à la conservation de l'énergie :

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau}(x, y, \tau) = - \text{div} \underline{\phi}(x, y, \tau) \quad (3.10)$$

Si on injecte la loi de Fourier à deux dimensions dans l'équation (3.10), on obtient l'équation de la diffusion de la chaleur à deux dimensions:

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} (x, y, \tau) = \lambda \operatorname{div} (\operatorname{grad} (t (x, y, \tau))) \quad (3.11)$$

ou

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} (x, y, \tau) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (3.12)$$

qui peut encore s'écrire :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} (x, y) = a \nabla^2 t (x, y, \tau) \quad (3.13)$$

avec

$$a = \text{diffusivité thermique} = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

$$\nabla^2 = \text{opérateur laplacien} = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$$

L'équation (3.13) constitue une équation aux dérivées partielles de type parabolique qui devra être résolue en utilisant une méthode numérique appropriée et des conditions aux limites correspondant à la réalité physique.

3.4.4. Conditions aux limites

D'une manière générale, les équations de type (3.13) peuvent être associées à 3 types de conditions aux limites sur la frontière du domaine modélisé.

Tout d'abord, la condition aux limites la plus simple consiste à imposer, au cours du temps, la valeur de la température en un point de la frontière du domaine.

$$t (x_0, y_0, \tau) = t_0 (\tau) \quad (3.14)$$

Ce type de condition porte le nom de condition de Dirichlet. Alternativement, la variable duale, à savoir le flux thermique, peut être imposée en un point de la frontière du domaine :

$$\varphi (x_0, y_0, \tau) = \varphi_0 (\tau) \quad (3.15)$$

Dans ce cas, on a affaire à une condition de Neumann.

Enfin, la troisième possibilité apparaît comme une combinaison des deux précédentes, à savoir, l'imposition d'une relation entre la température et le flux de chaleur :

$$a t(x_0, y_0, \tau) + b \varphi(x_0, y_0, \tau) + c = 0 \quad (3.16)$$

Cette condition porte le nom de condition de Fourier.

Par exemple, la relation entre la température et le flux de chaleur peut provenir d'un bilan énergétique au point (x_0, y_0) en lequel la condition est exprimée.

Dans notre cas, en ayant en tête le souci de confronter ce modèle à l'expérience, nous nous imposons d'utiliser au maximum toutes les mesures disponibles sous forme de conditions aux limites. Le seul profilé du mur de masse qui soit instrumenté (voir tableau 2.1) permet d'accéder aux mesures suivantes (fig. 3.5).

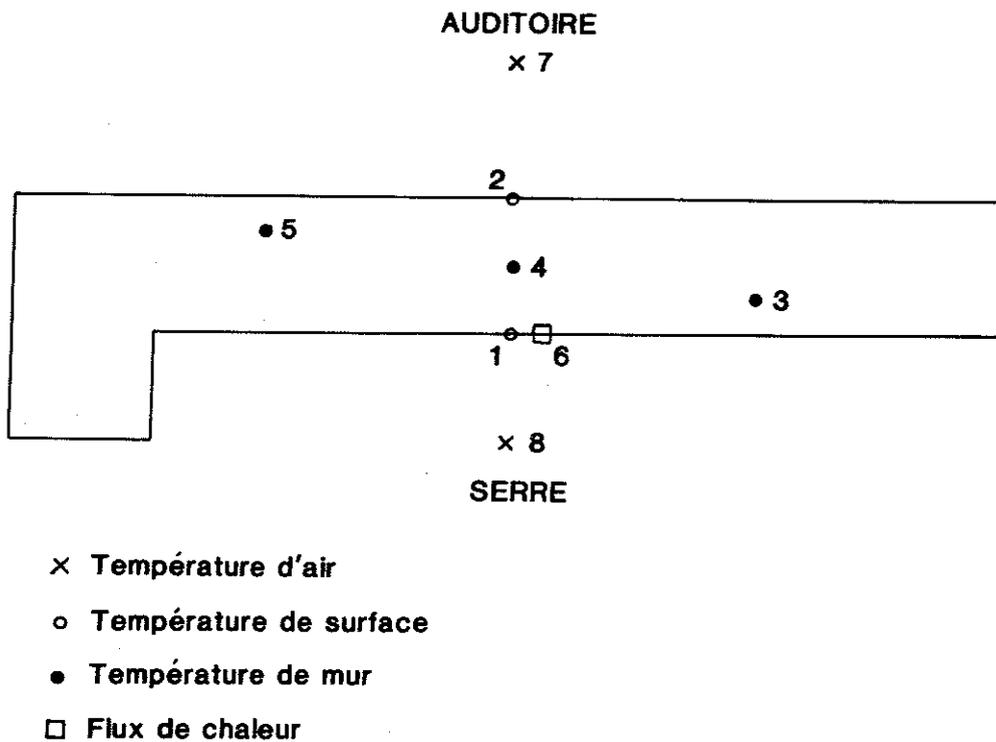


Fig. 3.5. Mesures disponibles dans un profilé du mur de masse

1. température de surface du profilé, côté serre
2. température de surface du profilé, côté auditoire
- 3, 4, 5. température dans la masse du profilé
6. flux de chaleur à la surface du profilé, côté serre
7. température d'air de l'auditoire
8. température d'air de la serre

Par conséquent, nous imposons les conditions aux limites suivantes :

1. condition de Dirichlet au point 1
2. condition de Dirichlet au point 2
3. condition de Neumann au point 6
4. condition de Fourier en tous les autres points de la surface du profilé

Ces dernières conditions s'expriment :

- côté serre :

$$g_{w_0} (t_a^r - t(x, y)) + \alpha_{w_0} S = \varphi(x, y) \quad (3.17)$$

avec g_{w_0} = coefficient d'échange globalisé (convectif et radiatif) entre la serre et le mur de masse
 t_a^r = température résultante de la serre
 α_{w_0} = coefficient d'absorption solaire à la surface du mur de masse

- côté auditoire :

$$g_{w_n} (t_{room}^r - t(x, y)) = \varphi(x, y) \quad (3.18)$$

avec g_{w_n} = coefficient d'échange globalisé entre l'auditoire et le mur de masse
 t_{room}^r = température résultante de l'auditoire

5. les températures dans la masse du profilé (aux points 3, 4 et 5) serviront à vérifier la validité du modèle

3.4.5. Solution numérique

Une équation aux dérivées partielles parabolique telle que (3.13) ne possède de solution analytique que dans des situations bien précises et "académiques" : conditions aux limites et solutions périodiques ou pouvant s'y ramener par un développement en série de Fourier.

Dans la majorité des cas, la solution analytique s'avère impossible et une résolution numérique, impliquant la discrétisation de l'équation aux dérivées partielles doit être mise en oeuvre. Plusieurs familles de méthodes sont disponibles et utilisables :

- les méthodes d'éléments finis
- les méthodes de volumes finis
- les méthodes de différences finies

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser une méthode de la troisième catégorie. Elle permet en effet un développement de code assez rapide. La méthode des différences finies consiste à discrétiser le milieu continu (espace-temps) dans lequel doit se résoudre l'équation suivant un pas $(\Delta x, \Delta y, \Delta t)$ et à résoudre l'équation discrétisée en chacun des points du réseau ainsi obtenu.

La discrétisation de l'équation est obtenue en remplaçant les dérivées partielles intervenant dans (3.13) par une approximation obtenue par un développement en série de Taylor : les différences finies.

Ainsi, si i, j et k sont les indices discrétisés correspondant aux variables x, y et τ (autrement dit $x = i \Delta x, y = j \Delta y, \tau = k \Delta \tau$), les dérivées partielles de (3.13) deviennent :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}(x, y, \tau) \cong \frac{t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k}{\Delta \tau} \quad (3.19a)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}(x, y, \tau) \cong \frac{t_{i+1,j}^k - 2t_{i,j}^k + t_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} \quad (3.19b)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}(x, y, \tau) \cong \frac{t_{i,j+1}^k - 2t_{i,j}^k + t_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} \quad (3.19c)$$

dans le schéma "explicite", ainsi dénommé parce que les dérivées spatiales sont évaluées à l'instant k.

Elles deviennent :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} (x, y, \tau) \equiv \frac{t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k}{\Delta \tau} \quad (3.20)a$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} (x, y, \tau) \equiv \frac{t_{i+1,j}^{k+1} - 2t_{i,j}^{k+1} + t_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} \quad (3.20)b$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} (x, y, \tau) \equiv \frac{t_{i,j+1}^{k+1} - 2t_{i,j}^{k+1} + t_{i,j-1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} \quad (3.20)c$$

dans le schéma "implicite", ainsi dénommé parce que les dérivées spatiales sont évaluées à l'instant k+ 1.

Enfin, elles deviennent :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} (x, y, \tau) \equiv \frac{t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k}{\Delta \tau} \quad (3.21)a$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} (x, y, \tau) \equiv \frac{a [t_{i+1,j}^k - 2t_{i,j}^k + t_{i-1,j}^k] + b [t_{i+1,j}^{k+1} - 2t_{i,j}^{k+1} + t_{i-1,j}^{k+1}]}{(\Delta x)^2} \quad (3.21)b$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} (x, y, \tau) \equiv \frac{a [t_{i,j+1}^k - 2t_{i,j}^k + t_{i,j-1}^k] + b [t_{i,j+1}^{k+1} - 2t_{i,j}^{k+1} + t_{i,j-1}^{k+1}]}{(\Delta y)^2} \quad (3.21)c$$

dans le schéma "mixte". Dans ce schéma, a et b sont deux facteurs de pondération dont la somme vaut 1. En particulier, a = b = 0.5 fournit le schéma de Crank-Nicholson, fréquemment utilisé pour résoudre les problèmes de conduction thermique (Ngendakumana, 1988), (Liebecq, 1988).

Les schémas explicites tels que (3.19) sont aisés à résoudre de proche en proche mais leur stabilité et leur convergence sont conditionnés par la condition de Courant (Patankar, 1980) :

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c_p}{\lambda} \quad (3.22)$$

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta y^2} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c_p}{\lambda} \quad (3.23)$$

Abgrall et Padet (1982) et Waters et Wright (1985) proposent une optimisation de $\Delta\tau$ et Δx^2 (Δy^2) pour assurer la consistance (adéquation avec la solution exacte) de la méthode. Le problème de la précision de ce type d'approximations est étudié par Letherman (1977) et par Butler et Letherman (1980).

Les schémas implicites et les schémas mixtes impliquent la résolution simultanée de plusieurs équations et apparaissent dès lors plus complexes à résoudre. Les méthodes les plus approfondies pour la résolution des systèmes d'équations obtenus appartiennent à la famille des méthodes itératives : Jacobi, Gauss-Seidel, relaxation. En effet, la matrice du système est très creuse (elle contient énormément de zéros). Dans le cas où l'utilisation de telles méthodes s'avère impossible, on se rabattra sur les méthodes d'inversion propres aux matrices "bandes" (Hennuy et al, 1978). L'avantage des schémas implicites et mixtes réside dans leurs inconditionnelles stabilité et convergence. Par contre, la consistance de la méthode n'est assurée que pour les schémas implicites purs.

Dans le cadre de cette étude, nous avons uniquement fait usage de la méthode explicite. Elle ne pose en effet aucun problème de stabilité ni de convergence au vu des faibles valeurs de la conductivité thermique ($\sim 10^{-6}$) et des valeurs de Δt (900 s), Δx (~ 0.25 m) et Δy (~ 0.05 m) sélectionnées.

3.4.6. Utilisation du modèle développé

Le modèle présenté et développé ci-dessus a été implémenté dans un programme de simulation spécifiquement développé afin de représenter l'évolution du flux de chaleur dans un "profilé - pilote" du bâtiment académique de la FUL. Pour ce faire, les conditions aux limites (3.4.4) sont fournies par des valeurs effectivement mesurées tandis que les températures de l'intérieur de la masse du profilé (3 points) sont comparées aux valeurs relevées par les instruments de mesure.

Le programme dénommé "WALLDF" calcule l'évolution dynamique du champ de température bi-dimensionnel dans un mur de section horizontale en forme de "L", soumis à des conditions aux limites de Dirichlet, Neumann et de Fourier sur le périmètre du profilé. Le mur est supposé séparer deux zones comme l'indique la figure 3.4.

Le programme fait usage des paramètres suivants (voir figure 3.6) :

- conductivité thermique du matériau [W/mK]
- capacité thermique du matériau [J/kgK]
- masse volumique du matériau [kg/m³]
- coefficient d'absorption solaire côté "serre" []
- dimension du profilé (L1, H1, L2, H2) [m]
- caractéristiques du maillage dans le mur (Δx_1 , Δy_1) [m]
- caractéristiques du maillage dans le refend (Δx_2 , Δy_2) [m]
- Pas de temps du calcul et durée de la simulation [s]

Le programme utilise les variables d'entrée suivantes afin de produire les conditions aux limites de la simulation :

- température de surface du profilé, côté "serre"
- température de surface du profilé, côté "auditoire"
- température d'air de la serre
- température d'air de l'auditoire
- ensoleillement global horizontal extérieur

Les caractéristiques du maillage sont représentées à la figure 3.6.

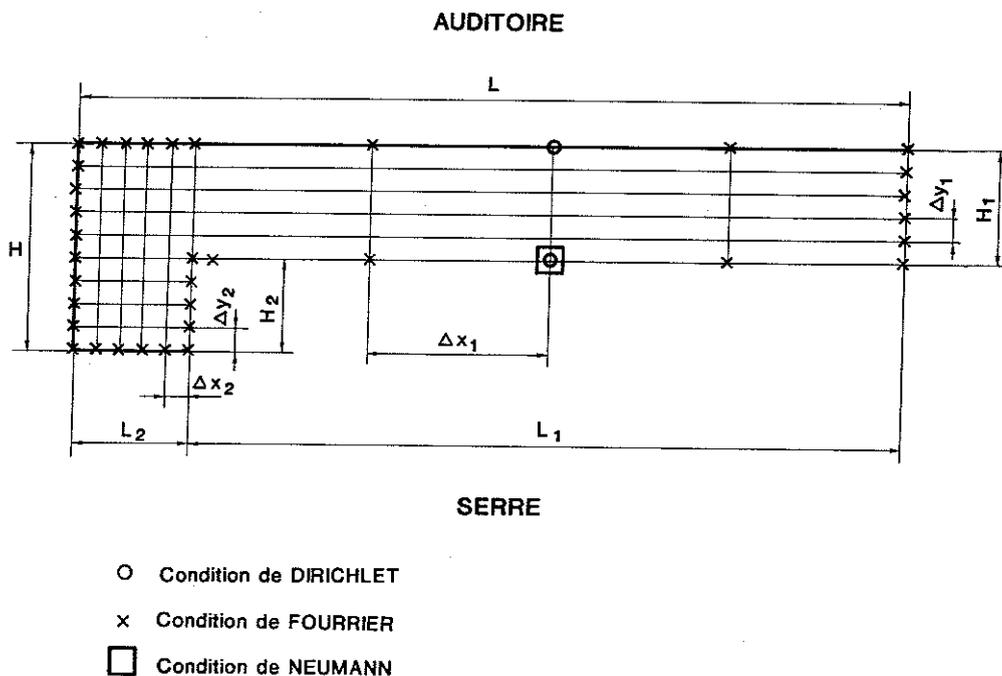


Fig. 3.6. Maillage et conditions aux limites de la simulation

Le programme fournit, comme résultat, à chaque pas de temps :

- Les coefficients d'échange globalisés, côté "serre" et "auditoire", obtenus par bilan énergétique aux deux points où la température de surface est connue (conditions de Dirichlet).
- La température calculée en chaque point du maillage, en particulier aux points de la surface où une condition aux limites de Fourier prévaut.
- Le tracé des isothermes, avec une résolution de 0.1 °C dans tout le profilé. Le calcul des isothermes est effectué de la façon suivante :
 1. Affectation de chaque point du réseau où la température est calculée à une isotherme
 2. Tracé de l'isotherme de proche en proche en utilisant une expression mathématique de l'isotherme sous forme différentielle

$$dt(x,y) = 0 \quad (3.24)$$

soit

$$\frac{\partial t}{\partial x} dx + \frac{\partial t}{\partial y} dy = 0 \quad (3.25)$$

Si on résout l'équation (3.25) en fonction de dy/dx , on obtient l'équation différentielle d'une isotherme :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\partial t / \partial x}{\partial t / \partial y} \quad (3.26)$$

En un point (x, y) donné, la direction de l'isotherme passant par ce point est donnée par (3.26) et peut être estimée par une évaluation numérique des gradients $\partial t / \partial x$ et $\partial t / \partial y$ en ce point (par troncature au premier ordre d'un développement en série de Taylor):

$$\frac{\partial t}{\partial x}(x, y) \cong \frac{t(i+1, j) - t(i, j)}{\Delta x} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y}(x, y) \cong \frac{t(i, j+1) - t(i, j)}{\Delta y} \quad (3.28)$$

avec $i = \frac{x}{\Delta x}$ et $j = \frac{y}{\Delta y}$

Enfin, la pente de l'isotherme peut être approchée par :

$$\frac{dy}{dx} \cong \frac{t(i+1, j) - t(i, j)}{t(i, j+1) - t(i, j)} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3.29)$$

A partir d'un point (x_0, y_0) donné, le tracé de proche en proche de l'isotherme se fait en recherchant le point (x_1, y_1) le plus proche de (x_0, y_0) et dans la direction indiquée par (3.29). La procédure est répétée jusqu'à épuisement de l'isotherme correspondante ou obtention d'un point situé sur la frontière.

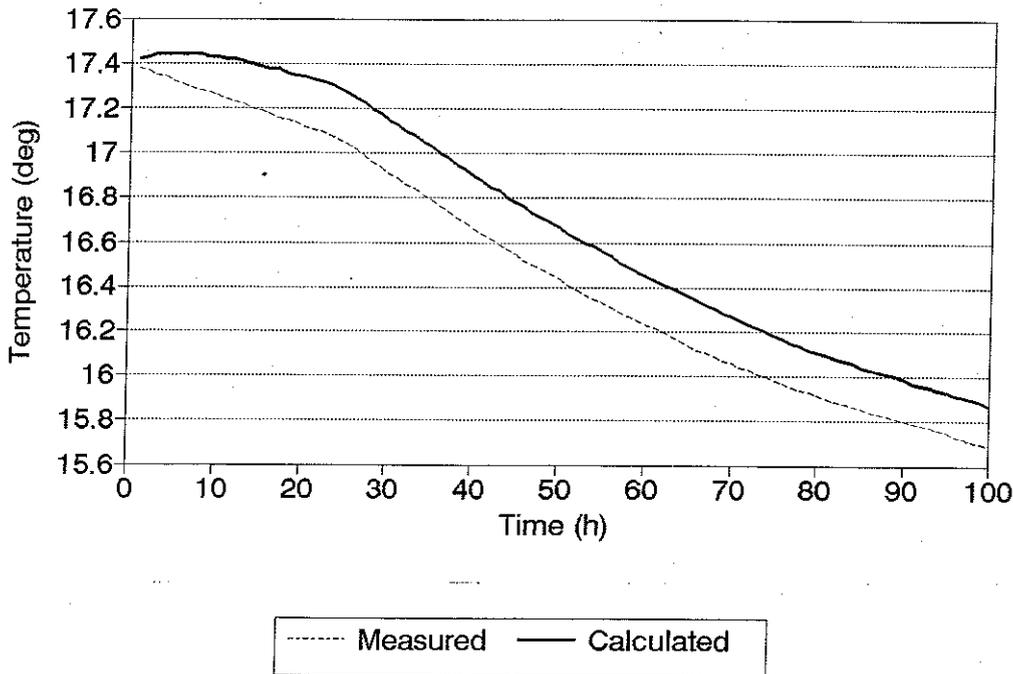


Fig. 3.7. Evolution de la température au point central du profilé. Comparaison Modèle bi-dimensionnel - Mesures

A titre d'exemple, la figure (3.7) montre l'évolution de la température calculée au point central du profilé, comparée à la valeur mesurée. La figure (3.8) montre un dessin des isothermes à un instant donné du calcul (04.02.89 à 13 H 45'). La simulation concerne une période de février 89.

Tel quel

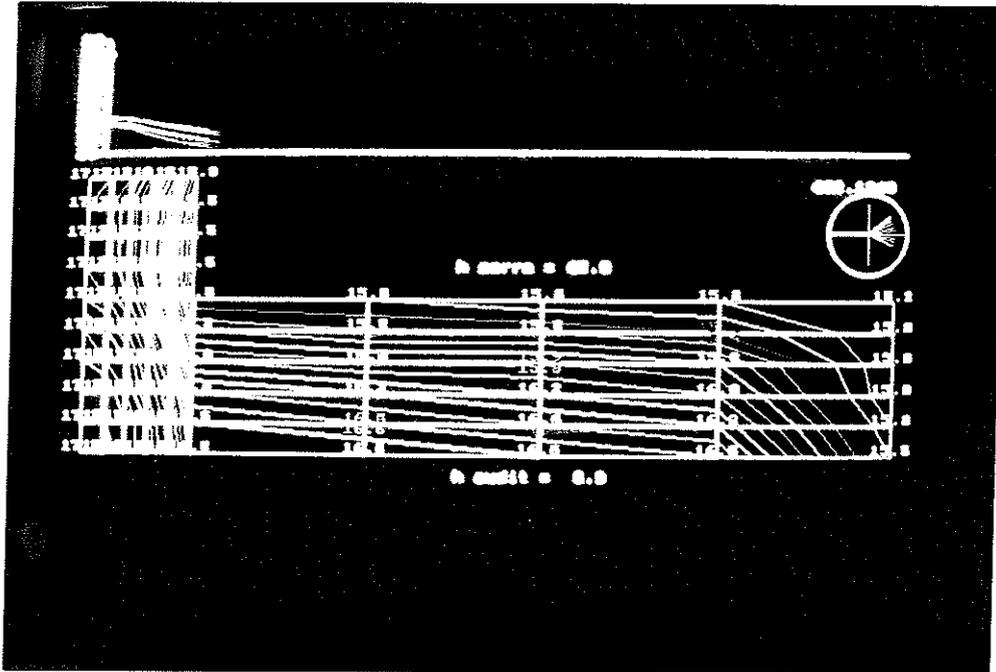


Fig. 3.8. Isothermes dans le profilé, le 04.02.89 à 13H 45

La simulation a fait usage de la valeur suivante des paramètres.

conductivité thermique : 1.7 W/mK
 capacité thermique : 840 J/kg K
 masse volumique : 2400 kg/m³
 absorption solaire : 0.1
 dimensions : L₁= 1.55 m
 H₁= 0.25 m
 L₂= 0.25 m
 H₂= 0.20 m
 caractéristiques du maillages : Δx₁ = 0.3875 m
 Δy₁ = 0.0625 m
 Δx₂ = 0.0625 m
 Δy₂ = 0.0625 m
 pas de temps : 900 secondes

La figure 3.7 montre la bonne qualité prédictive du modèle. Les écarts entre grandeur mesurée et calculée ne dépassent pas 0.25°C , ce qui correspond à la précision de la sonde de mesure. Il est à noter que la précision de la modélisation apparaît liée aux valeurs choisies pour les différents paramètres, en particulier le coefficient d'absorption solaire du mur. Ici, une valeur de 0.1°C a été choisie afin de traduire le caractère blanc du mur et également le fait que le rayonnement solaire est régulièrement intercepté par des éléments extérieurs au mur (voir 2.6.1), ce que ce modèle, limité à la représentation du mur, ne peut prendre en compte de façon explicite.

La figure 3.8 montre le tracé assez particulier des isothermes. Dans la partie "centrale" du profilé, elles apparaissent pratiquement horizontales et, dans ce cas, un modèle unidimensionnel classique pourrait suffire. Par contre, les parties latérales, en particulier la "petite" branche du L exhibe des isothermes dirigées suivant un axe perpendiculaire au précédent, ce qui équivaut à montrer l'existence des lignes de flux permettant une conduction thermique accélérée entre les deux faces du profilé (moindre distance à parcourir). Dans ce cas, un modèle bi-dimensionnel s'avère indispensable pour représenter correctement le phénomène, à moins de déterminer une valeur "équivalente" de la conductivité thermique unidimensionnelle. Le chapitre 4 propose des pistes à ce sujet.

3.5. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT

L'utilisation de modèles mathématiques a investi toutes les disciplines scientifiques, des sciences exactes aux sciences sociales. L'avènement et l'utilisation des modèles a été spécialement renforcé par la mise à disposition de l'outil informatique qui permet un usage pragmatique et concret des modèles les plus sophistiqués en fournissant le support matériel et logiciel nécessaire à leur implémentation. Le domaine de l'environnement n'échappe évidemment pas à cette règle générale et, dans ce contexte, la modélisation mathématique apparaît comme la seule capable d'unifier les disciplines constitutives des différentes facettes d'un problème d'environnement. En effet, la modélisation mathématique permet de formaliser, dans un langage abstrait et commun, l'expression d'une multitude de relations de cause à effet, qu'elles soient d'origine physique, biologique, économique ou autre, et de les rendre manipulables par un utilisateur commun : l'environnementaliste. Les modèles permettent, par exemple, au décideur de comparer le coût de l'implantation d'une station d'épuration (modèle mathématique d'épuration) en tenant compte de l'impact sur l'écoulement des eaux et le réseau hydrographique (modèle mathématique hydraulique), de la conjoncture économique à plus ou moins long terme (modèle mathématique économique) et de tout autre paramètre quantifiable, fût ce de façon très grossière (le point de vue esthétique par exemple). Personne ne sera dès lors étonné de découvrir la profusion de modèles développés dans les différentes disciplines sous-tendant un problème d'environnement. A titre d'exemple, Lassiter et Hayne (1971) modélisent les processus dynamiques dans les écosystèmes par des techniques de différences finies analogues à celle proposée en 3.4.5.

Ainsi qu'il sera montré au chapitre suivant, le formalisme mathématique trouve une unification encore plus grande dans le cadre de la théorie des systèmes. Cette théorie propose un contexte rigoureux et général dans lequel un modèle mathématique, quelle que soit la discipline originelle, s'exprime comme un opérateur différentiel agissant sur un espace mathématique abstrait, l'espace d' "état", état signifiant dans ce cas toute propriété quantifiable caractérisant le système étudié. "Esperanto" de la modélisation, la théorie des systèmes permet de poser un problème d'environnement dans un langage clair, précis, cohérent. Il n'est dès lors pas étonnant qu'il en soit fait un usage considérable dans la discipline écologique. Pour cette raison, ce chapitre ne proposera pas d'autres exemples d'application de la modélisation aux problèmes d'environnement. Un éventail des différentes possibilités sera procuré au chapitre suivant, en adoptant les prescriptions de la théorie des systèmes.

3.6. CONCLUSION DU CHAPITRE

Compagne de la mesure, la modélisation mathématique apparaît comme une auxiliaire indispensable pour l'analyse quantifiée d'une situation environnementale. Ce chapitre a passé en revue les différents types de modèles mathématiques et a illustré la démarche de modélisation sur un exemple extrait de la problématique de la thermique du bâtiment, en particulier le dispositif "mur de masse". Deux modèles d'échelle différente, l'un "simplifié", l'autre "complexe" (ces notions apparaissant d'ailleurs entièrement relatives) ont été développés et implémentés sous forme de modules informatiques. Dans chaque cas, le développement du modèle proprement dit a dû être précédé d'une observation du système modélisé, d'une sélection d'hypothèses de travail, d'une description des phénomènes physiques observés, d'un choix de conditions aux limites pertinentes. La modélisation a conduit à un ensemble d'équations différentielles ou algébriques qui ont dû être résolues par l'une ou l'autre méthode appropriée. La généralisation a montré que cette démarche convenait à une foule de problèmes relevant de la discipline environnementale et trouvait dans l'apport de la théorie des systèmes un mécanisme "intégrateur" alliant rigueur et souplesse d'adaptation.

CHAPITRE 4.

ANALYSE DES SYSTÈMES

4.1. INTRODUCTION

Basée sur un formalisme mathématique solide et rigoureux, la théorie des systèmes a donné lieu à de nombreuses applications dans des domaines variés des sciences et techniques de l'ingénieur : électronique, mécanique, aéronautique, génie chimique, ... Depuis une bonne dizaine d'années, on assiste à un développement de l'utilisation des techniques de l'automatique à la physique du bâtiment, en particulier dans le domaine de la thermique et de l'étude des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air. Il s'agit d'un champ d'application particulièrement adéquat dans la mesure où l'ordre et la dimension des modèles mathématiques généralement utilisés dans le domaine du bâtiment correspondent bien aux spécifications d'une application réaliste, c'est-à-dire à la fois précise et suffisamment parcimonieuse, des algorithmes mathématiques. Ce chapitre a pour objectif d'illustrer, dans différents problèmes de thermique du bâtiment, l'utilisation de techniques automatiques diverses en vue de résoudre des problèmes concrets : développement de modèles dynamiques simplifiés, identification de paramètres, calcul de stratégies de contrôle optimales et adaptatives. La généralisation à une foule de problèmes environnementaux sera alors montrée en même temps que les conséquences de la spécificité de ce type de problèmes.

4.2. RAPPEL DES FONDEMENTS THÉORIQUES DE L'ANALYSE DES SYSTÈMES

4.2.1. Généralités

La théorie des systèmes constitue une branche des mathématiques appliquées susceptible d'être utilisée dans un grand nombre de problèmes techniques (mécanique, électrique, chimique, thermique) et non-techniques (biologique, économique, écologique, ...). L'étendue de son applicabilité réside dans le caractère rigoureux de ses fondements théoriques : la théorie manipule en suivant les prescriptions d'un langage mathématique cohérent et synthétique, des objets abstraits mais dont la caractéristique essentielle est qu'ils peuvent, sans difficulté notable autre que l'art de les modéliser, recevoir une interprétation particulièrement féconde en termes d'applications concrètes. En d'autres termes, dès qu'un problème est formalisé et décrit dans le langage de la théorie des systèmes, tout un arsenal de techniques et de ressources mathématiques fiables et rigoureuses devient utilisable en vue de réaliser différents objectifs : développer des modèles et les interpréter, identifier les paramètres de ces modèles, utiliser ces modèles pour aboutir à un meilleur contrôle, voire optimal, du système modélisé.

La théorie des systèmes s'attache avant tout à décrire l'évolution de systèmes au cours du temps. Variable indépendante de tout système, le temps possède bien une essence fondamentale qui va se répercuter au niveau de la classification des systèmes considérés par la théorie. C'est ainsi que la distinction s'opère tout naturellement entre les systèmes statiques (ou à réponse instantanée) et dynamiques (ou à réponse retardée) caractérisés par l'existence d'une "constante de temps" ou indice de la vitesse de réaction d'un phénomène à une perturbation.

Outre le temps, différentes variables caractérisent la description mathématique d'un système. Il s'agit des :

- variables d'état ou variables internes du système (variables endogènes)

Ces variables décrivent le comportement interne ou intrinsèque du système. Elles peuvent éventuellement échapper à l'observation de l'intérieur du système.

- variables d'entrée/sortie (variables exogènes)

Ces variables décrivent l'interaction entre le système et son environnement et sont, par conséquent, accessibles à l'utilisateur. Elles se divisent en variables d'entrée (action du milieu extérieur sur le système) et en variables de sortie (action du système sur le milieu extérieur).

Ces variables d'entrées peuvent, elles-mêmes, être classifiées de façon plus détaillée en

- variables de commande, correspondant aux variables sur lesquelles l'utilisateur possède une action (variables commandables)
- variables perturbatrices, correspondant aux variables sur lesquelles l'utilisateur ne peut exercer aucune action (variables non commandables)

- paramètres

Indépendamment des variables qui servent à quantifier son évolution, un système est décrit mathématiquement par un ensemble de paramètres dont la propriété essentielle est qu'ils ne subissent, théoriquement, aucune modification au cours du temps.

La construction d'un modèle mathématique pour un système donné consiste à sélectionner les variables et paramètres intervenant de façon significative dans la description des phénomènes physiques caractérisant le système et à établir mathématiquement les relations entre ces différents éléments.

Si l'on utilise la convention de notation suivante :

- \underline{x} : variables d'état
- \underline{u} : variables d'entrée commandables
- \underline{v} : variables d'entrée non commandables (perturbations)
- \underline{y} : variables de sortie
- \underline{p} : paramètres
- τ : temps

l'expression mathématique la plus générale pour la description d'un système est constituée des deux équations suivantes :

- une équation décrivant le comportement interne du système (équation d'état) :

$$\dot{\underline{x}}(\underline{t}) \equiv \underline{f}(\underline{t}, \underline{x}(\underline{t}), \underline{u}(\underline{t}), \underline{v}(\underline{t}), \underline{p}) \quad (4.1)$$

- une équation décrivant l'interaction entre le système et le milieu extérieur (équation de sortie) :

$$\underline{y}(\underline{t}) \equiv \underline{g}(\underline{t}, \underline{x}(\underline{t}), \underline{u}(\underline{t}), \underline{v}(\underline{t}), \underline{p}) \quad (4.2)$$

Ces équations sont tout à fait générales et, de ce fait, recouvrent tous les modèles possibles de système.

Une classe importante de systèmes, à laquelle sera d'ailleurs restreinte la suite de l'étude, est constituée par la classe des systèmes "linéaires", c'est-à-dire ceux auxquels le Principe de Superposition est applicable : une sollicitation double engendre, après extinction des transitoires, une réponse également doublée. Pour cette catégorie particulière de systèmes, les équations générales deviennent :

Equation d'état :

$$\dot{\underline{x}}(\tau) = \underline{A} \underline{x}(\tau) + \underline{B} \underline{u}(\tau) + \underline{E} \underline{v}(\tau) \quad (4.3)$$

Equation de sortie :

$$\underline{y}(\tau) = \underline{C} \underline{x}(\tau) + \underline{D} \underline{u}(\tau) + \underline{F} \underline{v}(\tau) \quad (4.4)$$

Les coefficients \underline{A} , \underline{B} , \underline{E} , \underline{C} , \underline{D} , et \underline{F} , sont, en toute généralité, des matrices dont les dimensions sont liées aux dimensions respectives des vecteurs d'état, de commande, de perturbation, de sortie : ce sont les paramètres du système. Comme signalé ci-dessus, ces paramètres sont en principe constants. Toutefois, une classe particulière des systèmes, désignés sous le vocable de "vari-linéaires" sont caractérisés par des paramètres variables, ce qui ne compromet cependant pas leur linéarité. Ces systèmes s'expriment par des équations du type :

Equation d'état :

$$\dot{\underline{X}}(\tau) = \underline{A}(\tau) \underline{X}(\tau) + \underline{B}(\tau) \underline{U}(\tau) + \underline{E}(\tau) \underline{Y}(\tau) \quad (4.5)$$

Equation de sortie :

$$\dot{\underline{Y}}(\tau) = \underline{C}(\tau) \underline{X}(\tau) + \underline{D}(\tau) \underline{U}(\tau) + \underline{F}(\tau) \underline{Y}(\tau) \quad (4.6)$$

Ce type de représentation s'avère parfois adéquat afin de représenter par un modèle linéaire un système physique qui ne l'est pas : la modélisation considère alors une succession de modèles linéaires au cours du temps, chaque modèle étant valable pendant un intervalle de temps donné.

Une fois posé dans ces termes, tout problème abordé dans le cadre de la théorie des systèmes, peut recevoir différentes approches : le développement de modèles simplifiés, l'identification expérimentale des modèles, la synthèse de stratégies de contrôle basées sur des modèles.

4.2.2. Représentation d'un modèle dans le cadre de la théorie des systèmes

Différentes approches sont possibles afin d'aboutir à un modèle mathématique s'exprimant dans le cadre de la théorie des systèmes.

4.2.2.1. Le développement d'un modèle simplifié basé sur des hypothèses réalistes, directement dans le formalisme de la théorie

Tout l'art de la modélisation consiste alors à sélectionner les variables à prendre en compte afin de représenter correctement les aspects du phénomène que l'on étudie et à réaliser un calcul adéquat des paramètres de ce modèle afin de satisfaire certains critères désirés.

4.2.2.2. La réduction d'un modèle complexe

Les méthodes de la théorie des systèmes manipulent préférentiellement des modèles d'ordre relativement réduit. En effet, les algorithmes proposent, dans ce cas là, des conditions de stabilité, de convergence et de consistance mieux garanties. Par ailleurs, la modélisation de "grands" systèmes, caractérisée par un spectre très étendu de modes et de constantes de temps, fait l'objet de méthodes spéciales ("Theory of large systems") dans le détail desquelles nous n'entrons pas. Nous nous plaçons dans la situation où un modèle donné "complexe" est disponible et doit être réduit de façon à devenir compatible avec les algorithmes de la théorie des systèmes et ce, dans un objectif de simulation, d'identification ou de contrôle.

De nombreuses méthodes ont été développées afin de satisfaire cet objectif. De nombreuses méthodes ont été développées afin de satisfaire cet objectif. Ngendakumana (1988) en présente quelques-unes. Les développements personnels ci-dessous, sans être originaux, sont apparus néanmoins nécessaires à la mise en oeuvre de l'identification de systèmes multivariables, par application du Filtre de Kalman (voir 4.4.7) ainsi qu'à la représentation des modèles dans le cadre de la théorie des systèmes (voir 4.3.2).

- Elimination des variables algébriques

Dans de nombreux problèmes, le système d'équation d'état (4.3) provient physiquement de l'expression d'un bilan (de matière, de quantité de mouvement, d'énergie) qui, avant passage à la forme (4.3) s'écrit :

$$\underline{\underline{G}} \dot{\underline{x}}(\tau) = \underline{\underline{A}}' \underline{x}(\tau) + \underline{\underline{B}}' u(\tau) + \underline{\underline{E}}' v(\tau) \quad (4.7)$$

La relation avec (4.3) se fait par identification terme à terme :

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{G}}^{-1} \underline{\underline{A}}' \quad (4.8)a$$

$$\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{G}}^{-1} \underline{\underline{B}}' \quad (4.8)b$$

$$\underline{\underline{E}} = \underline{\underline{G}}^{-1} \underline{\underline{E}}' \quad (4.8)c$$

La matrice $\underline{\underline{G}}$ correspond à la matrice des capacités thermiques (en thermique), à la matrice de rigidité (en analyse structurelle), à la matrice des capacités électriques (en électricité), elle représente l'inertie du processus étudié et se présente sous forme diagonale.

Dans certains cas, l'inertie attachée à une variable peut être négligée et le vecteur d'état peut être partitionné en deux de façon à isoler les variables "sans inertie".

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} \underline{x}_1 \\ \underline{x}_2 \end{pmatrix} \quad (\text{dimension } n) \quad (4.9)$$

avec \underline{x}_1 : variables d'état avec inertie ou "dynamiques" (dimension n_1)
 \underline{x}_2 : variables d'état sans inertie ou "algébriques" (dimension n_2)

Le système d'état (4.7) doit être modifié en fonction de cette nouvelle définition. Les matrices \underline{A}' , \underline{B}' , \underline{E}' et \underline{G} deviennent, après partitionnement :

$$\underline{A}' = \begin{bmatrix} \underline{A}'_{11} & \underline{A}'_{12} \\ \underline{A}'_{21} & \underline{A}'_{22} \end{bmatrix} \quad \underline{B}' = \begin{bmatrix} \underline{B}'_1 \\ \underline{B}'_2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\underline{E}' = \begin{bmatrix} \underline{E}'_1 \\ \underline{E}'_2 \end{bmatrix} \quad \underline{G} = \begin{bmatrix} \underline{G}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

et dans ce cas, les relations (4.8) ne sont plus applicables puisque la matrice \underline{G} est devenue singulière.

Le système d'état se décompose en deux sous-systèmes, l'un différentiel, l'autre algébrique :

$$\underline{G}_1 \dot{\underline{x}}_1(\tau) = \underline{A}'_{11} \underline{x}_1(\tau) + \underline{A}'_{12} \underline{x}_2(\tau) + \underline{B}'_1 \underline{u}(\tau) + \underline{E}'_1 v(\tau) \quad (4.11)a$$

$$0 = \underline{A}'_{21} \underline{x}_1(\tau) + \underline{A}'_{22} \underline{x}_2(\tau) + \underline{B}'_2 \underline{u}(\tau) + \underline{E}'_2 v(\tau) \quad (4.11)b$$

L'équation (4.11)b permet d'éliminer les variables algébriques :

$$\underline{x}_2(\tau) = -(\underline{A}'_{22})^{-1} \left[\underline{A}'_{21} \underline{x}_1(\tau) + \underline{B}'_2 \underline{u}(\tau) + \underline{E}'_2 v(\tau) \right] \quad (4.12)$$

à la condition de la non singularité de la matrice \underline{A}'_{22} .

Si on remplace (4.12) dans l'équation d'état différentielle (4.11)a, on obtient :

$$\begin{aligned} \underline{\underline{G}}_1 \dot{\underline{x}}_1(\tau) &= \underline{\underline{A}}'_{11} \underline{x}_1(\tau) + \underline{\underline{A}}'_{12} - (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \left[\underline{\underline{A}}'_{21} \underline{x}_1(\tau) + \underline{\underline{B}}'_2 \underline{u}(\tau) + \underline{\underline{E}}'_2 \underline{v}(\tau) \right] \\ &+ \underline{\underline{B}}'_2 \underline{u}(\tau) + \underline{\underline{E}}'_1 \underline{v}(\tau) \end{aligned}$$

et, en regroupant les termes :

$$\begin{aligned} \underline{\underline{G}}_1 \dot{\underline{x}}_1(\tau) &= \left[\underline{\underline{A}}'_{11} - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{A}}'_{21} \right] \underline{x}_1(\tau) + \left[\underline{\underline{B}}'_1 - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{B}}'_2 \right] \underline{u}(\tau) \\ &+ \left[\underline{\underline{E}}'_1 - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{E}}'_2 \right] \underline{v}(\tau) \end{aligned} \quad (4.13)$$

qui est l'expression d'une équation d'état classique (4.3) avec :

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{G}}_1^{-1} \left[\underline{\underline{A}}'_{11} - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{A}}'_{21} \right] \quad (4.14a)$$

$$\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{G}}_1^{-1} \left[\underline{\underline{B}}'_1 - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{B}}'_2 \right] \quad (4.14b)$$

$$\underline{\underline{E}} = \underline{\underline{G}}_1^{-1} \left[\underline{\underline{E}}'_1 - \underline{\underline{A}}'_{12} (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{E}}'_2 \right] \quad (4.14c)$$

En suivant la même procédure, l'équation de sortie (4.4) se transforme en

$$\underline{y} = \underline{\underline{C}}'_1 \underline{x}_1(\tau) + \underline{\underline{C}}'_2 \underline{x}_2(\tau) + \underline{\underline{D}}' \underline{u}(\tau) + \underline{\underline{F}}' \underline{v}(\tau) \quad (4.15)$$

ou, en remplaçant $\underline{x}_2(\tau)$ par (4.12)

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \underline{\underline{C}}'_1 \underline{x}_1(\tau) + \underline{\underline{C}}'_2 \left[-(\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \left[\underline{\underline{A}}'_{21} \underline{x}_1(\tau) + \underline{\underline{B}}'_2 \underline{u}(\tau) + \underline{\underline{E}}'_2 \underline{v}(\tau) \right] \right] + \underline{\underline{D}}' \underline{u}(\tau) \\ &+ \underline{\underline{F}}' \underline{v}(\tau) \end{aligned}$$

et, en regroupant les termes :

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \left[\underline{\underline{C}}'_1 - \underline{\underline{C}}'_2 (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{A}}'_{21} \right] \underline{x}_1(\tau) + \left[\underline{\underline{D}}' - \underline{\underline{C}}'_2 (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{B}}'_2 \right] \underline{u}(\tau) \\ &+ \left[\underline{\underline{F}}' - \underline{\underline{C}}'_2 (\underline{\underline{A}}'_{22})^{-1} \underline{\underline{E}}'_2 \right] \underline{v}(\tau) \end{aligned} \quad (4.16)$$

qui correspond à une équation de sortie classique (4.4) avec :

$$\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{C}}_1' - \underline{\underline{C}}_2' (\underline{\underline{A}}_{22}')^{-1} \underline{\underline{A}}_{21}' \quad (4.17)a$$

$$\underline{\underline{D}} = \underline{\underline{D}}' - \underline{\underline{C}}_2' (\underline{\underline{A}}_{22}')^{-1} \underline{\underline{B}}_2' \quad (4.17)b$$

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{F}}' - \underline{\underline{C}}_2' (\underline{\underline{A}}_{22}')^{-1} \underline{\underline{E}}_2' \quad (4.17)c$$

Cette méthode est présentée par Ngendakamana (1988) sous le nom ("Technique des perturbations singulières"). Le même auteur propose les autres techniques suivantes :

- Agrégation linéaire des variables d'état

Cette technique consiste à grouper les variables d'état en deux catégories, les variables "lentes" et les variables "rapides. La distinction entre les deux catégories s'opère sur base de l'énergie associée à chaque mode durant le régime transitoire, en réponse à une sollicitation test. La technique permet de conserver les mêmes conditions de stabilité que le système de départ.

Les variables d'état du modèle réduit $\underline{z}(\tau)$ sont reliées aux variables d'état du modèle de départ par :

$$\underline{z}(\tau) = \underline{\underline{K}} \underline{x}(\tau) \quad (4.18)$$

et le modèle d'état "réduit" s'exprime (en regroupant variables d'entrée et perturbations) par :

$$\dot{\underline{z}}(\tau) = \underline{\underline{F}} \underline{z}(\tau) + \underline{\underline{G}} \underline{u}(\tau) \quad (4.19)a$$

$$\hat{\underline{y}}(\tau) = \underline{\underline{H}} \underline{z}(\tau) + \underline{\underline{I}} \underline{u}(\tau) \quad (4.19)b$$

où $\underline{\underline{K}}$ est une matrice d'agrégation telle que

$$\underline{\underline{F}} \underline{\underline{K}} = \underline{\underline{K}} \underline{\underline{A}}$$

$$\text{et } \underline{\underline{G}} = \underline{\underline{K}} \underline{\underline{B}}$$

L'agrégation linéaire consiste à transformer la matrice du système complet en une forme modale ou de Jordan $\underline{\underline{J}}$:

$$\underline{\underline{J}} = \underline{\underline{M}}^{-1} \underline{\underline{A}} \underline{\underline{M}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{J}} & 0 \\ 0 & \underline{\underline{J}}_2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

avec $\underline{\underline{M}}$ matrice modale de $\underline{\underline{A}}$

Ensuite, la matrice d'agrégation $\underline{\underline{K}}$ est choisie de façon à ce que

$$\underline{\underline{K}} = \underline{\underline{M}} \underline{\underline{L}}_{=0} \quad (4.21)$$

$$\text{avec } \underline{\underline{L}}_{=0} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{I}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{\underline{M}}^{-1}$$

$\underline{\underline{I}}$ = matrice identité de dimension m

$\underline{\underline{M}}_{=0}$ = matrice arbitraire non singulière

Les matrices \underline{F} et \underline{G} sont alors données par

$$\underline{F} = \underline{M} \underline{J} \underline{M}^{-1} \quad (4.22)a$$

$$\underline{G} = \underline{M} \underline{L} \underline{B} \quad (4.22)b$$

Dans cette expression, \underline{J} , contient les valeurs propres de la matrice \underline{A} qui sont retenues par l'agrégation. Par conséquent, les valeurs propres de \underline{F} sont aussi valeurs propres de \underline{A} et le système réduit possède les mêmes conditions de stabilité que le système de départ. La méthode demande cependant des moyens informatiques importants.

Réduction optimale au sens d'un critère quadratique

Dans cette technique, le choix des variables d'état du modèle réduit a pour but de minimiser l'écart (calculé par un critère quadratique) entre la réponse des deux modèles, calculé pour une période donnée suite à une sollicitation donnée. Cette méthode conduit à des calculs lourds qui la rendent inapplicable si l'ordre du modèle de départ est élevé.

En considérant un modèle "complet" (regroupant de nouveau variables d'entrée et perturbations)

$$\dot{\underline{x}}(\tau) = \underline{A} \underline{x}(\tau) + \underline{B} \underline{u}(\tau) \quad (4.23)a$$

$$\underline{y}(\tau) = \underline{C} \underline{x}(\tau) + \underline{D} \underline{u}(\tau) \quad (4.23)b$$

et un modèle "simplifié" (réduit)

$$\dot{\underline{z}}(\tau) = \underline{F} \underline{z}(\tau) + \underline{G} \underline{u}(\tau) \quad (4.24)a$$

$$\hat{\underline{y}}(\tau) = \underline{H} \underline{z}(\tau) + \underline{I} \underline{u}(\tau) \quad (4.24)b$$

Cette méthode consiste à déterminer les matrices, \underline{F} , \underline{G} , \underline{H} et \underline{I} du modèle réduit de façon à minimiser un critère représentant l'écart entre les deux modèles. Un tel critère est donné par exemple par la fonctionnelle :

$$S = \sum_{j=1}^P \int_0^{\infty} (\underline{y}^j - \hat{\underline{y}}^j)^T (\underline{y}^j - \hat{\underline{y}}^j) d\tau \quad (4.25)$$

où \underline{y}^j et $\hat{\underline{y}}^j$ sont les réponses des deux modèles à une sollicitation test appliquée sur l'entrée j .

Réduction par développement limité

Cette technique constitue l'équivalent de la précédente dans le domaine de Laplace. Son objectif est de déterminer une approximation d'ordre réduit de la fonction de transfert du système, qui apparaisse valable pour les pôles dominants du système.

A partir de la fonction de transfert du modèle complet :

$$\underline{y}(s) = \underline{G}(s) \underline{u}(s) \quad (4.26)$$

et de la fonction de transfert du modèle réduit :

$$\hat{\underline{y}}(s) = \underline{K}(s) \underline{u}(s) \quad (4.27)$$

La méthode suppose que les matrices de transfert peuvent s'exprimer comme des fractions rationnelles :

$$\underline{G}(s) = \frac{\underline{H}(s)}{\underline{d}(s)} \quad (4.28)$$

$$\underline{K}(s) = \frac{\underline{Z}(s)}{\underline{q}(s)} \quad (4.29)$$

Le problème consiste à déterminer l'approximation $\underline{K}(s)$ de façon à ce qu'elle approche $\underline{G}(s)$, spécialement pour les pôles les plus significatifs (plus proches de l'origine), correspondant aux modes lents du système. Pour ce faire, on peut utiliser la technique des approximatifs de Padé ou la méthode des approximatifs de Routh, éventuellement biaisés (Ngendakumana, 1988). Cette méthode apparaît également extrêmement lourde à mettre en oeuvre.

4.2.2.3. Modification d'un modèle existant

Le développement de nombreux modèles se déroule en dehors du contexte de la théorie des systèmes et conduit à des expressions mathématiques ne cadrant pas avec le formalisme de la théorie des systèmes. Un retour à ce formalisme s'avère cependant souvent possible et s'effectue en :

- définissant les dimensions du système étudié
- définissant les variables d'état, d'entrée, de sortie, perturbatrices, éventuellement à partir d'une combinaison de variables du modèle de départ
- reformulant les équations du modèle en termes de ces nouvelles variables.

Ainsi, des modèles complexes, régis par des équations aux dérivées partielles, peuvent très bien s'exprimer dans un formalisme d'équation d'état (Gorez, 1979). Par exemple, l'équation aux dérivées partielles du second ordre :

$$\gamma \varphi S(\xi) \frac{\partial t(\tau, \xi)}{\partial \tau} = \mu \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \frac{\partial t(\tau, \xi)}{\partial \tau} \right] - \alpha p(\xi) [t(\tau, G - t_a(\tau))] \quad (4.30)$$

associée à ses deux conditions aux limites

$$-\mu S(0) \frac{\partial t(\tau, \xi)}{\partial \xi} = q(t) \quad (4.31)a$$

$$\frac{\partial \theta(\tau, L)}{\partial \xi} = 0 \quad (4.31)b$$

constitue une équation d'état définie sur un espace de dimension infinie $C([0, L], R)$. Ce modèle représente l'évolution de flux de chaleur à la surface d'une ailette de refroidissement en fonction du temps τ et d'une coordonnée spatiale ξ .

4.2.3. Identification expérimentale de modèles

Dans certains cas, le calcul des paramètres des modèles simplifiés n'est pas possible, parce que le système modélisé est trop complexe, ou mal connu, ou qu'il fait intervenir des grandeurs non aisément quantifiables. C'est le cas aussi lorsque le modèle constitue une description tellement simplifiée de la réalité que les coefficients de ce modèle ne possèdent plus de sens physique. Dans ce cas-là, à condition de disposer de mesures relatives au système étudié, il est possible d'utiliser un arsenal de méthodes, essentiellement de nature statistique, aptes à réaliser l'estimation des valeurs des paramètres des modèles. Ces méthodes ont, de plus, l'avantage de gommer les imperfections de la modélisation et de produire une solution reliée de près à la réalité expérimentale. Elles présentent toutefois des risques liés essentiellement à la précision des mesures disponibles, aux algorithmes numériques utilisés et au choix de la structure des modèles choisis.

L'identification d'un système consiste, à partir d'un modèle de ce système, de mesures réalisées sur le système et d'un critère d'optimisation adéquat, à réaliser une estimation fiable de la valeur des paramètres du système. Schématiquement, une procédure d'identification peut être représentée par la figure 4.1.

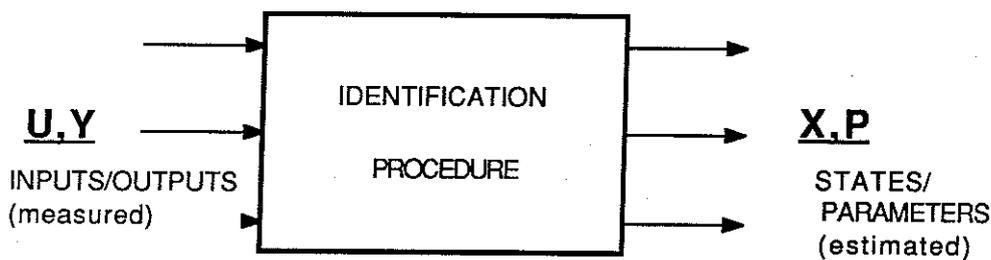


Fig. 4.1. Vue schématique d'une procédure d'identification

La procédure utilise les mesures des variables d'entrée et de sortie d'un système pour produire une estimation des paramètres et/ou des variables d'état non mesurées.

Une procédure d'identification comprend classiquement 4 étapes :

1. Définition d'un modèle simplifié du système à étudier en utilisant une des méthodes du paragraphe précédent.
2. Sélection des quatre ingrédients nécessaires pour la réalisation d'une identification :
 - des données sur le système
 - un formalisme de représentation du modèle choisi (équation d'état, fonction de transfert, équation aux différences, modèle stochastique, ...)
 - un critère d'optimisation
 - un algorithme d'estimation des paramètres du modèle
3. Estimation des paramètres du modèle dans le formalisme choisi.
4. Calcul des paramètres physiques du modèle afin d'effectuer une interprétation des résultats.

La théorie de l'identification a reçu une attention considérable de la part des automaticiens depuis une vingtaine d'années. Aström et Eykhoff (1971) effectuent une étude systématique des méthodes disponibles à l'époque. Vingt ans plus tard, Eykhoff et Parks (1990) dressent le bilan et présentent les nouvelles tendances en la matière, articulées autour d'une démarche scientifique à présent bien connue. La figure 4.2 représente les différentes étapes de cette démarche, de la récolte des données à l'obtention du modèle final.

Le but de cette thèse n'étant pas de fournir une présentation détaillée des méthodes disponibles, nous nous contenterons d'illustrer cette problématique par deux exemples, la méthode réursive RELS ("Recursive Extended Least Squares") et la méthode du Filtre de Kalman ("Kalman Filter") qui sera utilisée dans la suite de ce travail (Söderström et al, 1978). Des ouvrages de référence en la matière sont par exemple fournis par Eykhoff (1974), Ljung et Söderström (1983) et Ljung (1987).

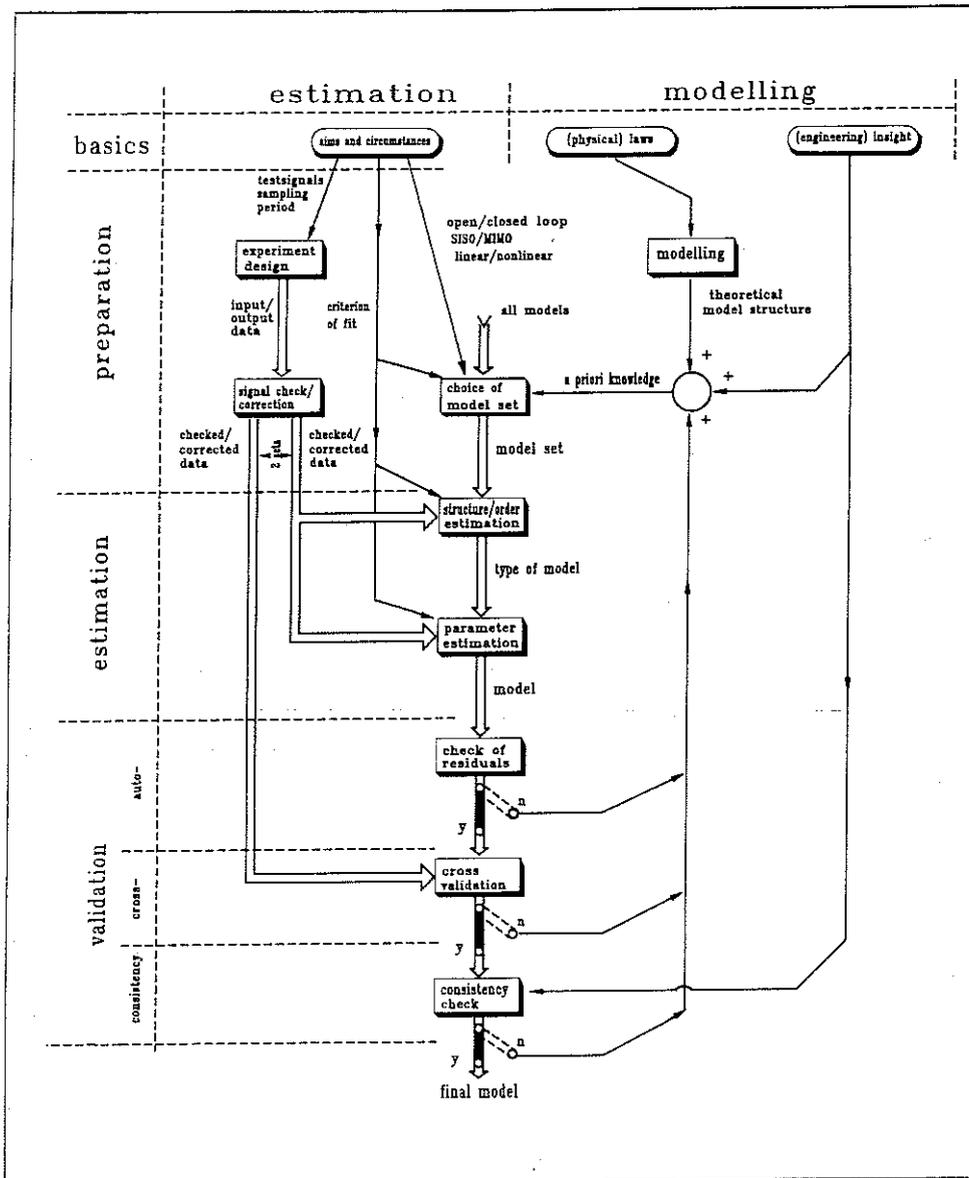


Fig. 4.2. Les différentes étapes de l'identification d'un système (d'après Eykhoff et Parks (1990))

- La méthode "RELS"

La méthode RELS constitue l'une des méthodes les plus élémentaires d'identification des paramètres d'un système monovariable. Elle s'applique à des modèles linéaires et stochastiques du système étudié et constitue une application directe du principe des moindres carrés.

A partir d'un système décrit par son équation entrée-sortie et dans le formalisme discret par :

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + H(z^{-1})e(t) \quad (4.32)$$

où $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ et $H(z^{-1})$ représentent les polynômes de degré n_a , n_b et n_c en la variable "délai" z^{-1} (formalisme de la Transformée en Z)

et $e(t)$ représente une séquence de bruit blanc,

l'identification du système par la méthode "RELS" consiste à estimer les paramètres du modèle

$$\hat{A}(z^{-1})y(t) = \hat{B}(z^{-1})u(t) + \hat{H}(z^{-1})\varepsilon(t) \quad (4.33)$$

où $\hat{A}(z^{-1})$, $\hat{B}(z^{-1})$ et $\hat{H}(z^{-1})$ désignent les polynômes à identifier et $\varepsilon(t)$ la séquence des résidus du modèle :

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (4.34)$$

La méthode des "moindres carrés étendus" (RELS) produit une estimation récursive des paramètres \underline{p} du modèle (4.33) à partir de l'acquisition progressive des mesures des variables d'entrée et de sortie (($u(t)$ et $y(t)$) au moyen de l'algorithme suivant, valable pour toute une gamme de méthodes d'identification.

$$\underline{\hat{p}}(t+1) = \underline{\hat{p}}(t) + \underline{K}(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (4.35)a$$

$$\underline{K}(t+1) = \frac{\underline{P}(t)\underline{z}(t+1)}{\lambda(t+1) + \underline{\varphi}(t+1)^T \underline{P}(t)\underline{z}(t+1)} \quad (4.35)b$$

$$\underline{P}(t+1) = \left[\underline{P}(t) - \frac{\underline{P}(t)\underline{z}(t+1)\underline{\varphi}(t+1)^T \underline{P}(t)}{\lambda(t+1) + \underline{\varphi}(t+1)^T \underline{P}(t)\underline{z}(t+1)} \right] \cdot \frac{1}{\lambda(t+1)} \quad (4.35)c$$

$$\lambda(t+1) = \lambda_0 \lambda(t) + 1 - \lambda_0 \quad (4.35)d$$

dans lequel :

- le vecteur $\underline{\varphi}(t)$ contient les mesures sur le système

$$\underline{\varphi}(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_c)]^T$$

- le vecteur $\underline{z}(t)$, dans le cas particulier de la méthode RELS est équivalent au vecteur $\underline{\varphi}(t)$

$$\underline{z}(t) = \underline{\varphi}(t)$$

- le vecteur $\underline{\hat{p}}(t)$ contient l'estimation des paramètres à l'instant t :

$$\underline{\hat{p}} = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{n_a}, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{n_b}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{n_c}]$$

- $\lambda(t)$ est un facteur permettant de diminuer de façon progressive l'influence des mesures passées (facteur d'oubli) à partir d'une valeur initiale $\lambda(0)$ et d'une constante λ_0 déterminant la capacité de la mémoire
- $\underline{P}(t)$ est une matrice dont la fonction est de réorienter de façon récursive la recherche de l'optimum dans l'espace multidimensionnel des paramètres.

A partir de ces considérations, la valeur prédite par le modèle se calcule par le produit matriciel

$$\hat{y}(t) = \underline{\varphi}(t)^T \hat{\underline{p}}(t-1) \quad (4.36)$$

et le résidu (4.34) par

$$\varepsilon(t) = y(t) - \underline{\varphi}(t)^T \hat{\underline{p}}(t-1) \quad (4.37)$$

Comme bon nombre de ses congénères, cet algorithme fonctionne pour les systèmes SISO (Single Input - Single Output). Il peut toutefois être étendu sans grandes difficultés aux systèmes MISO (Multi Input - Single Output). Par contre, l'identification des systèmes MIMO (Multi Input - Multi Output) requiert l'utilisation de méthodes spéciales, émergeant à la théorie des systèmes multivariés, par exemple le Filtre de Kalman.

- Le Filtre de Kalman

L'algorithme du Filtre de Kalman constitue au départ une méthode d'estimation de l'état d'un système, opération parfois dénommée "reconstruction d'état", à partir de mesures des variables d'entrée et de sortie (De Larminat et Thomas, 1977 b).

A partir d'un système décrit dans sa représentation d'état et dans le formalisme discret par

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A} \underline{x}(k) + \underline{B} \underline{u}(k) + \underline{v}(k) \quad (4.38)a$$

$$\underline{y}(k) = \underline{C} \underline{x}(k) + \underline{D} \underline{u}(k) + \underline{w}(k) \quad (4.38)b$$

et moyennant certaines hypothèses sur les séquences $\underline{v}(k)$ et $\underline{w}(k)$, le Filtre de Kalman réalise, de façon récursive, une estimation de l'état actuel du système (instant k) et une prédiction de l'état à venir du même système (instant $k+1$), ces deux grandeurs étant considérées par l'algorithme comme des variables aléatoires conditionnées par la connaissance (mesures) du système à l'instant k .

Le Filtre procède en deux étapes :

1. Estimation

$$\hat{\underline{x}}_{k/k} = \hat{\underline{x}}_{k/k-1} + \underline{P}_{k/k-1} \underline{C}^T (\underline{C} \underline{P}_{k/k-1} \underline{C}^T + \underline{R})^{-1} (\underline{y}_k - \underline{C} \hat{\underline{x}}_{k/k-1} - \underline{D} \underline{u}_k) \quad (4.39)a$$

$$\underline{P}_{k/k} = \underline{P}_{k/k-1} - \underline{P}_{k/k-1} \underline{C}^T (\underline{C} \underline{P}_{k/k-1} \underline{C}^T + \underline{R})^{-1} \underline{C} \underline{P}_{k/k-1} \quad (4.39)b$$

où, pour la commodité, l'indice k/k signifie la considération de la grandeur indicée à l'instant k avec les connaissances disponibles à l'instant k tandis que l'indice $k/k-1$ signifie la considération de la grandeur indicée à l'instant k avec les connaissances disponibles à l'instant $k-1$.

2. Prédiction

$$\hat{\underline{x}}_{k+1/k} = \underline{A} \hat{\underline{x}}_{k/k} + \underline{B} \underline{u}_k \quad (4.40)a$$

$$\underline{P}_{k+1/k} = \underline{A} \underline{P}_{k/k} \underline{A}^T + \underline{Q} \quad (4.40)b$$

où l'indice $k+1/k$ signifie la considération de la grandeur indicée à l'instant $k+1$ avec les connaissances disponibles à l'instant k .

Dans ces équations, \underline{P} représente la matrice des variances-covariances de l'estimation d'état alors que les matrices \underline{Q} et \underline{R} jouent le même rôle pour les séquences stochastiques \underline{v} et \underline{w} (\underline{Q} variance de \underline{v} , \underline{R} variance de \underline{w} , la matrice de covariance entre \underline{v} et \underline{w} étant supposée identiquement nulle).

Les équations montrent que l'algorithme du Filtre De Kalman est à même de considérer des systèmes MIMO et, de plus, variables dans le temps. Il peut également s'appliquer à l'estimation des paramètres à condition de considérer ceux-ci comme des variables d'état additionnelles. Dans ce cas, l'équation d'état (4.38) se voit adjoindre le système suivant :

$$\underline{p}_{k+1} = \underline{p}_k \quad (4.41)$$

symbolisant l'invariance temporelle des paramètres. Dans certains cas une évolution markovienne peut être postulée. Associée au vecteur d'état \underline{x} , le vecteur des paramètres \underline{p} définit l'état "augmenté" \underline{z} :

$$\underline{z}_k = \begin{bmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{p}_k \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

et l'algorithme des Filtre de Kalman peut s'appliquer à ce nouveau vecteur. Ceci rend toutefois le système à identifier non linéaire dans la mesure où il fait apparaître des produits entre les nouvelles variables d'état. Afin de rester applicable, le Filtre de Kalman doit alors subir une linéarisation par développement en série de Taylor autour d'un point de fonctionnement dans l'espace états-paramètres. Cette procédure de linéarisation donne lieu à l'algorithme du Filtre de Kalman Etendu (EKF, "Extended Kalman Filtering"). Cet algorithme a également été utilisé dans le cadre de ce travail (voir 4.4.7).

4.2.4. Développement de stratégies de contrôle

Dans de nombreux problèmes physiques, la nécessité de disposer d'un modèle du phénomène étudié provient du besoin de contrôler le système en question. Par rapport à des stratégies de contrôle relativement simples, la théorie des systèmes permet de développer, à partir d'un modèle, des algorithmes de contrôles optimaux, prenant en compte le caractère multivariable des systèmes réels, des critères de contrôle complexes ou des perturbations affectant le comportement du système.

La théorie de la commande optimale a pour objet la détermination des profils de commande à appliquer à un système de façon à minimiser un critère de performance du système. A cause de la relative simplicité du formalisme, la théorie s'est surtout développée pour les systèmes linéaires et les critères quadratiques. De plus, la plupart des problèmes réels sont résolus par la voie numérique, ce qui requiert la formulation des problèmes en temps discret. La suite du développement concernera dès lors la commande optimale des systèmes linéaires avec coût quadratique représentés en temps discret.

Dans ce contexte, le problème à résoudre est le suivant : (De Larminat et Thomas, 1977b)
 Pour le système suivant, décrit par l'équation d'état (dans le formalisme discret)

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A}\underline{x}(k) + \underline{B}\underline{u}(k) + \underline{C}\underline{v}(k) \quad (4.43)$$

déterminer la séquence de contrôle optimal

$$\{\underline{u}(k)\} \quad (k \in [0, N-1])$$

de façon à minimiser le critère suivant

$$J = \frac{1}{2} \underline{x}^t(n) \underline{F} \underline{x}(n) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} \left[\underline{x}^t(i) \underline{Q} \underline{x}(i) + \underline{u}^t(i) \underline{R} \underline{u}(i) \right] \quad (4.44)$$

avec \underline{F} , \underline{R} , \underline{Q} , matrices de pondération de dimension adéquate et supposées définies positives, et n , horizon d'optimisation, en nombre d'intervalles de temps de discrétisation.

Une solution possible pour ce problème est constituée par la Programmation Dynamique de Bellmann. Une autre approche est l'application du Principe du Maximum de Pontryagin. Dans cette dernière méthode, la résolution du problème fait intervenir la grandeur suivante, dénommée "Hamiltonien" :

$$H = \sum_{i=0}^{n-1} \left\{ \frac{1}{2} \left[\underline{x}^t(i) \underline{Q} \underline{x}(i) + \underline{u}^t(i) \underline{R} \underline{u}(i) \right] + \underline{\lambda}^t(i+1) \left[\underline{A} \underline{x}(i) + \underline{B} \underline{u}(i) + \underline{C} \underline{v}(i) - \underline{x}(i+1) \right] \right\} + \frac{1}{2} \underline{x}^t(n) \underline{F} \underline{x}(n) \quad (4.45)$$

et s'exprime par les conditions

$$\frac{\delta H}{\delta \underline{x}(i)} = 0 \quad \text{pour } i = 1, \dots, N$$

$$\frac{\delta H}{\delta \underline{u}(i)} = 0 \quad \text{pour } i = 0, \dots, N-1$$

qui sont équivalentes aux relations

$$\underline{u}(i) = -\underline{R}^{-1} \underline{B}^t \underline{\lambda}(i+1) \quad (4.46)$$

$$\underline{\lambda}(i) = \underline{Q} \underline{x}(i) + \underline{A}^t \underline{\lambda}(i+1) \quad (4.47)$$

Le problème posé par la commande optimale consiste à calculer, au début de l'horizon d'optimisation, le profil de commande qui satisfasse les conditions exprimées ci-dessus en tenant compte du fait que le système à contrôler est décrit par l'équation d'état (4.43). Ceci implique une connaissance au début de l'horizon d'optimisation, de toutes les variables entrant en jeu, en particulier les variables perturbatrices. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser une prévision, sur la durée de l'horizon d'optimisation, de l'évolution des grandeurs perturbatrices.

Dans un cas tout à fait général, une technique de solution consiste à utiliser une méthode itérative (méthode du gradient par exemple) afin de déterminer le profil de contrôle optimal. La séquence d'opérations à réaliser est la suivante :

1. Réalisation d'une prévision des perturbations sur l'horizon d'optimisation
2. Choix d'un profil de commande $\underline{u}(i)$ arbitraire
3. Simulation du système avec cette loi de commande
4. Calcul de la fonction-coût associée
5. Calcul de la valeur terminale du vecteur adjoint à partir de la valeur finale de vecteur d'état
6. Résolution régressive de l'équation adjointe
7. Calcul du gradient de l'Hamiltonien à chaque instant
8. Calcul de la loi de commande dans le sens d'une réduction de l'Hamiltonien

$$\underline{u}(i) \rightarrow \underline{u}(i) - K \frac{\delta H}{\delta \underline{u}(i)} \quad (4.48)$$

où K est une constante de gain, choisie a priori

9. Saturation éventuelle de la loi de commande pour répondre aux contraintes technologiques

10. Resimulation du système avec la nouvelle loi de commande
11. Calcul de l'écart entre l'ancien coût et le nouveau
12. Si le critère choisi n'évolue plus, fin de l'optimisation, sinon retour en 3.

Le choix de la valeur du gain de l'algorithme du gradient (4.45) conditionne assez fortement l'efficacité de la convergence. Une valeur trop faible engendre une convergence trop lente; une valeur trop élevée risque de provoquer la divergence de l'algorithme. Certaines méthodes réalisent un calcul optimisé de ce gain : Newton-Raphson, Gauss-Newton, Fletcher-Powell, ...

La suite de ce chapitre va aborder l'application de ces différentes techniques dans le domaine de la physique du bâtiment.

4.3. OBTENTION DE MODÈLES SIMPLIFIÉS EN THERMIQUE DU BÂTIMENT

L'obtention d'un modèle susceptible d'être manipulé par la théorie des systèmes peut avoir trois origines différentes :

- soit la réduction d'un modèle complexe avec conservation des propriétés souhaitées de la modélisation
- soit la construction, à partir d'hypothèses adéquates, de modèles d'ordre réduit satisfaisant certaines exigences désirées.

4.3.1. Réduction de modèles en thermique du bâtiment

4.3.1.1. Généralités

Cette approche a fait l'objet de nombreux travaux, principalement en France. Ainsi, Benard (1986) propose une méthode d'optimisation de la représentation réduite d'une paroi en vue de l'application de théorie de la commande optimale à ces systèmes. La méthode utilisée fait usage d'une technique de développement limité proposée par ailleurs par Boileau et al. (1983) Neirac (1987) propose une méthode de réduction des modèles thermiques par agrégation linéaire des variables d'état. Des méthodes basées sur l'analyse modale sont décrites par Bacot et al. (1984), Sicard et al. (1985), Salgon et Neveu (1987) pour l'étude d'un pont thermique; l'application à l'identification de systèmes de modèles modaux est décrite par Bacot (1985) et Neveu et al (1986). D'autres applications sont proposées par Lefebvre et al. (1987), Lefebvre (1989) et Sfaxi et Grignon (1988).

4.3.1.2. Réduction du modèle simplifié du mur de masse

Le modèle décrit au chapitre précédent (§ 3.3) peut directement se voir manipulé dans le cadre de la théorie des systèmes. Il suffit en effet pour cela de réaliser la correspondance suivante entre les variables :

variables "algébriques" t_{ve} : température de la surface extérieure du vitrage
 t_{vi} : température de la surface inférieure du vitrage
 t_{wo} : température de la surface du mur, côté serre
 $t_{w_{n+1}}$: température de la surface du mur, côté auditoire

Ces variables résultent du caractère négligeable attaché aux capacités thermiques liées à ces températures et doivent être éliminées du modèle.

variables d'état : t_a : température d'air de la serre
 t_{w_i} (i=1,n): température de la masse du mur (n variables)

variables perturbatrices S_H : rayonnement solaire sur surface horizontale
 t_{sky} : température du ciel
 t_{ext} : température extérieure
 t_{ground} : température du sol
 t_{room} : température d'air des locaux adjacents
 t_{walls} : température des parois des locaux adjacents

variables d'entrée : aucune (le système est purement passif)

variables de sortie : les variables d'état éventuellement mesurables.

Dans ce modèle, les variables algébriques peuvent être éliminées en suivant la méthode proposée en 4.2.2.2. pour aboutir à un système différentiel d'ordre $n + 1$, où n est le nombre de noeuds considérés dans la masse des murs accumulateurs :

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} + \underline{B} \underline{u} + \underline{E} \underline{y} \quad (4.49)$$

avec :

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} t_a \\ t_{w_1} \\ \dots \\ t_{w_n} \end{bmatrix}$$

$$\underline{u} = [\quad]$$

$$\underline{v} = \begin{bmatrix} S_H \\ t_{\text{sky}} \\ t_{\text{ext}} \\ t_{\text{ground}} \\ t_{\text{room}} \\ t_{\text{walls}} \end{bmatrix}$$

Les matrices \underline{A} et \underline{E} sont fonction des paramètres physiques du système par un ensemble de relations présenté à l'annexe 1 de ce chapitre.

Ce modèle constitue le modèle d'état du mur de masse. Ce modèle peut recevoir différentes applications.

- Utilisation dans un logiciel de simulation : à partir des équations énoncées ci-dessus, une routine, compatible avec le logiciel de simulation de systèmes "TRNSYS" (University of Madison, 1990), a été développée. Ceci permet la connexion du composant mur de masse avec un composant type "zone" ou "bâtiment multizone" en vue de réaliser une simulation globale du bâtiment. Ce point est développé au chapitre 5.
- Application de techniques d'identification de systèmes : si on dispose de données expérimentales concernant l'évolution des températures du système, le modèle permet de réaliser une estimation de la valeur de certains coefficients d'échange. Ce point est développé ci-dessous.
- Développement de stratégies de contrôle : la stratégie de contrôle optimal des locaux adjacents au mur de masse peut être déterminée en utilisant le principe du Maximum de Pontryagin. L'apport spécifique du mur de masse peut être pris en compte par le modèle et incorporé dans le calcul de la rétroaction d'état optimale. Ce point est également développé ci-dessous.

4.3.2. Développement des modèles simplifiés en thermique du bâtiment

4.3.2.1. Généralités

La problématique du développement de modèles simplifiés a fait l'objet de travaux importants, notamment à l'Université de Liège. Deux thèses récentes, Laret (1980) et Ngendakmana (1988), lui sont consacrées. Les développements personnels qui suivent y font largement référence.

4.3.2.2. Développement d'un modèle simplifié pour un bâtiment multizone

Le modèle précédent était développé à partir d'une technique de bilan nodal. Laret (1980) a développé un formalisme de développement de modèle simplifié pour des structures d'habitation. La méthode est telle que le modèle simplifié respecte les propriétés suivantes du système complexe :

- résistance thermique globale (ou coefficient de déperdition global)
- rapport entre les déperditions à travers la partie "légère" de la structure et les déperditions totales
- paramètres de la réponse indicielle à une variation brusque du chauffage et de la température extérieure
- constante de temps

La procédure aboutit à un modèle d'ordre 2 pour chacune des zones à modéliser. Les variables d'état de ce modèle sont constituées par une température d'air (t_{ai}) et une température de paroi (t_{si}). Ce modèle est représenté à la figure 4.3 pour une zone. La modélisation d'un bâtiment multizone s'opère en associant, par des couplages résistifs, les différentes zones. Le calcul de la résistance de couplage se fait à partir des propriétés des parois qui séparent les deux zones.

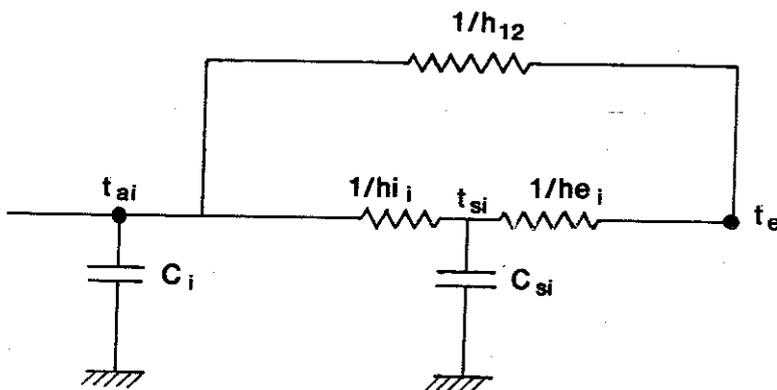


Fig. 4.3. Modèle simplifié pour une zone thermique

A titre d'exemple, cette procédure a été appliquée au bâtiment décrit au chapitre 2 (voir 2.2.1), en vue de caractériser les zones thermiques typiques par des techniques d'identification. Le bâtiment académique de la FUL est constitué essentiellement d'une zone centrale très vitrée fonctionnant suivant le principe solaire passif du gain direct et de deux zones latérales comprenant chacune un dispositif de type "mur de masse" et fonctionnant dès lors suivant le principe du gain indirect.

Un modèle très simplifié du bâtiment a été établi, comprenant 2 zones : la zone centrale à gain direct et les 2 zones latérales (considérées comme une seule zone) à gain indirect.

Selon le formalisme de Laret, chacune des zones est caractérisée par deux températures : une température d'air et une température de paroi. Par ailleurs, chacune des zones est soumise à une sollicitation de type "chauffage" et de type "ensoleillement" et également à la température extérieure.

Le réseau électrique analogue correspondant à ce modèle est représenté à la figure 4.4.

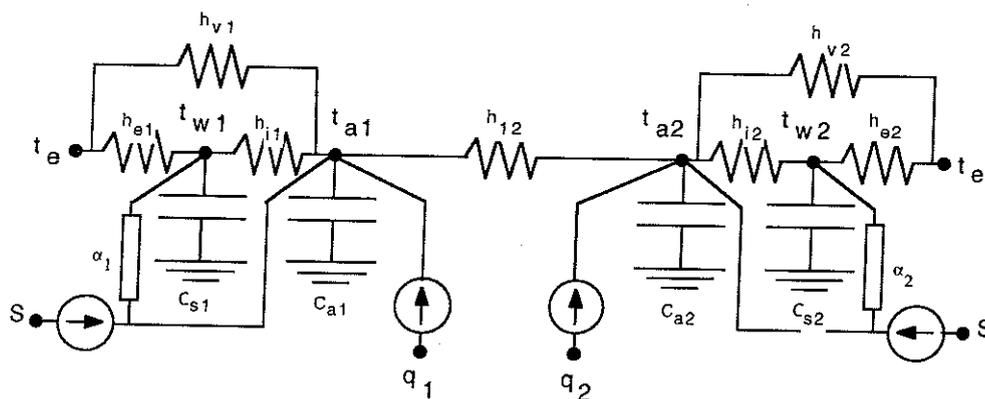


Fig. 4.4. Réseau électrique équivalent du modèle à 2 zones

Ce modèle comprend :
 4 variables d'état : t_{a1} , t_{s1} , t_{s2} , t_{a2}
 2 variables de sortie : t_{a1} , t_{a2}
 4 variables d'entrée : S , t_e , q_1 , q_2

avec

t_{a1} : température d'air de la zone 1
 t_{s1} : température de paroi de la zone 1
 t_{a2} : température d'air de la zone 2
 t_{s2} : température de paroi de la zone 2
 S : ensoleillement global
 t_e : température extérieure
 q_1 : source d'énergie dans la zone 1
 q_2 : source d'énergie dans la zone 2

L'expression du bilan énergétique en chacun des noeuds du système permet d'aboutir à l'expression du modèle en variables d'état :

$$\begin{aligned}
 C_{s_1} \frac{dt_{s_1}}{d\tau} &= h_{e_1} (t_e - t_{s_1}) + h_{i_1} (t_{a_1} - t_{s_1}) + \alpha_1 S \\
 C_{a_1} \frac{dt_{a_1}}{d\tau} &= h_{i_1} (t_{s_1} - t_{a_1}) + h_{v_1} (t_e - t_{a_1}) + h_{12} (t_{a_2} - t_{a_1}) + q_1 \\
 C_{a_2} \frac{dt_{a_2}}{d\tau} &= h_{i_2} (t_{s_2} - t_{a_2}) + h_{v_2} (t_e - t_{a_2}) + h_{12} (t_{a_1} - t_{a_2}) + q_2 \\
 C_{s_2} \frac{dt_{s_2}}{d\tau} &= h_{e_2} (t_e - t_{s_2}) + h_{i_2} (t_{a_2} - t_{s_2}) + \alpha_2 S
 \end{aligned} \tag{4.50}$$

qui peut s'écrire sous la forme

$$\dot{\underline{T}} = \underline{A} \underline{T} + \underline{B} \cdot \underline{U}$$

$$\text{avec } \underline{T} = \begin{bmatrix} t_{s_1} \\ t_{a_1} \\ t_{a_2} \\ t_{s_2} \end{bmatrix} \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} t_e \\ S \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{(h_{e_1} + h_{i_1})}{C_{s_1}} & \frac{h_{i_1}}{C_{s_1}} & 0 & 0 \\ \frac{h_{i_1}}{C_{a_1}} & \frac{-(h_{i_1} + h_{v_1} + h_{12})}{C_{a_1}} & \frac{h_{12}}{C_{a_1}} & 0 \\ 0 & \frac{h_{12}}{C_{a_2}} & \frac{-(h_{i_2} + h_{v_2} + h_{12})}{C_{a_2}} & \frac{h_{i_2}}{C_{a_2}} \\ 0 & 0 & \frac{h_{i_2}}{C_{s_2}} & \frac{-(h_{e_2} + h_{i_2})}{C_{s_2}} \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \frac{h_{e1}}{C_{s1}} & \frac{\alpha_1}{C_{s1}} & 0 & 0 \\ \frac{h_{v1}}{C_{a1}} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{h_{v2}}{C_{a2}} & 0 & 0 & 1 \\ \frac{h_{e2}}{C_{s2}} & \frac{\alpha_2}{C_{s2}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans ce modèle, les différents coefficients d'échange traduisent les couplages résistifs représentés à la figure 4.4.

Ce modèle sera utilisé en vue de l'identification des paramètres dynamiques caractéristiques de chacune des zones (voir paragraphe suivant).

4.4. IDENTIFICATION DE SYSTÈMES EN THERMIQUE DU BÂTIMENT

4.4.1. Introduction

L'application des techniques d'identification à la thermique du bâtiment a connu des développements importants au cours de ces dernières années, généralement motivés par le désir d'obtenir, par voie expérimentale, des modèles corrects du fonctionnement des bâtiments et aptes à gommer les nombreuses incertitudes sur les propriétés des matériaux, les coefficients d'échanges ou les phénomènes physiques en jeu.

Une excellente revue des méthodes disponibles est proposée par Rabi (1988). L'école française (Bacot, 1985) (Neveu et al, 1988), propose des développements directement en relation avec les travaux sur l'analyse modale. Plusieurs applications concernent l'étude de cellules-test (Norlen, 1990), (Norlen et Eriksson, 1990), (Hammarsten et al, 1988), (Dewson et al, 1993). Le problème de la signification des paramètres estimés est analysé par Bloem (1990) et Madsen et al (1990). Des méthodes originales, utilisant les séquences PRBS (Pseudo Random Binary Signal) sont proposées par Letherman et al (1982). Penman (1990) et Coley et Penman (1992) proposent une application concrète sur un bâtiment scolaire. Enfin, des applications traitant plus spécifiquement de méthodes travaillant sur la représentation d'état sont proposées par Hammarsten et Norlen (1987), Okuyama (1990) et Ouyang et Haghigat (1991).

4.4.2. Le logiciel d'identification "idsoft"

Deux logiciels d'identification ont été utilisés dans le cadre de cette étude : le logiciel IDSOFT spécifiquement développé à la FUL (André, 1993), limité aux systèmes MISO (Multi Inputs - Single Outputs) et le logiciel CYPROS (Camo, 1989), dont les modules KALMAX et EXKALM, basés sur le Filtre de Kalman, permettent de traiter les systèmes MIMO (Multi Inputs - Multi Outputs).

Développé en Pascal et en Fortran 77, le logiciel IDSOFT comprend environ 3000 lignes de codes et possède 7 modules dont les fonctions sont reprises ci-dessous :

1. Préanalyse statistique des fichiers de données
2. Prétraitement des données
3. Définition du système et spécification des fichiers de données
4. Choix des ingrédients de l'identification
5. Réalisation de la procédure d'identification
6. Observation des résultats
7. Post traitement des résultats

Les algorithmes disponibles comprennent les algorithmes non récursifs LS (Least Squares), MAR (Markov), ML (Maximum Likelihood), IV (Instrumental Variables), ELS (Extended Least Squares), GLS (Generalized Least Squares). Les versions récursives de ces algorithmes sont également disponibles (RLS, RELS, RML, RGLS, RIV).

4.4.3. Collecte de données

Le bâtiment académique de la FUL, présenté au chapitre 2, a fait l'objet d'un monitoring intensif qui s'est déroulé entre 1988 et 1990. Durant cette période, une soixantaine de variables (températures, consommations, vitesses d'air, climat extérieur) ont été mesurées et enregistrées, heure par heure. Le chapitre 2 procure toutes les informations nécessaires à ce sujet. Cette banque de données a dès lors pu servir de matière première pour l'application de différentes procédures d'identification. Les résultats relatifs aux procédures les plus significatives sont relatés ci-après.

4.4.4. Identification des paramètres du modèle du mur de masse

Le modèle du mur de masse, dont le développement a été expliqué au paragraphe 3.3. a servi de support à la réalisation d'une identification de ses paramètres (André et al, 1989).

Huit périodes, couvrant approximativement 10 jours, ont été choisies comme matière première pour l'identification. Le formalisme choisi pour la représentation du modèle est l'équation aux différences et le choix de l'algorithme d'optimisation s'est porté sur la méthode "RELS", utilisant un critère de moindres carrés sur un modèle stochastique.

Le passage de la représentation d'état au formalisme de l'équation aux différences s'effectue en associant à chaque équation d'état une équation de sortie (toutes les variables d'état de ce modèle sont mesurées) et en discrétisant l'équation entrée/sortie obtenue par l'association des deux équations. On obtient de la sorte le système d'équations aux différences suivant (avec 3 noeuds retenus pour la discrétisation de la paroi accumulatrice) :

$$\begin{aligned}
 0 &= a_{11} t_{ve}(k) + b_{11} S(k) + b_{12} t_{ext}(k) + a_{12} t_{vi}(k) + b_{13} t_{sky}(k) \\
 0 &= a_{22} t_{vi}(k) + b_{21} S(k) + a_{21} t_{ve}(k) + a_{23} t_a(k) + a_{24} t_{w_0}(k) \\
 t_A(k+1) &= a_{33} t_a(k) + a_{32} t_{vi}(k) + a_{34} t_{w_0}(k) + b_{34} t_{ground}(k) + b_{32} t_{ext}(k) \\
 0 &= a_{44} t_{w_0}(k) + b_{41} S(k) + b_{43} t_a(k) + a_{45} t_{w_1}(k) + b_{42} t_{vi}(k) \\
 t_{w_1}(k+1) &= a_{55} t_{w_1}(k) + a_{54} t_{w_0}(k) + a_{56} t_{w_2}(k) \\
 t_{w_2}(k+1) &= a_{66} t_{w_2}(k) + a_{65} t_{w_1}(k) + a_{67} t_{w_3}(k) \\
 t_{w_3}(k+1) &= a_{77} t_{w_3}(k) + a_{76} t_{w_2}(k) + a_{78} t_{w_4}(k) \\
 0 &= a_{88} t_{w_4}(k) + b_{86} t_{room}(k) + b_{87} t_{walls}(k) + a_{87} t_{w_3}(k)
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

Les coefficients a_{ij} et b_{ij} sont reliés aux paramètres physiques du modèle et sont fournis en annexe au présent chapitre (4.9.1).

Le logiciel IDSOFT a été utilisé pour réaliser l'estimation de ces paramètres. Comme mentionné ci-dessus, ce logiciel traite les systèmes de type "MISO". Par conséquent, la procédure d'identification a été appliquée séparément à chacun des noeuds du modèle. Nous présentons les résultats relatifs à deux noeuds du modèle.

4.4.4.1. Identification de la diffusivité thermique du matériau constituant la paroi accumulative (noeud n° 6)

Réécrivons l'équation relative à ce noeud sous la forme suivante :

$$t_{w_2}(k+1) = a_{66}t_{w_2}(k) + a_{65}t_{w_1}(k) + a_{67}t_{w_3}(k) \quad (4.52)$$

Les coefficients a_{66} , a_{65} et a_{67} sont liés aux coefficients physiques par les relations suivantes :

$$a_{66} = 1 - \frac{\Delta \tau}{V_{w_2} (\rho c_p)_{w_2}} \left(\frac{\lambda_{w_3}}{e_{w_3}} A_{w_3} + \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} A_{w_1} \right)$$

$$a_{65} = \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} \frac{\Delta \tau}{V_{w_1} (\rho c_p)_{w_1}} A_{w_1}$$

$$a_{67} = \frac{\lambda_{w_3}}{e_{w_3}} \frac{\Delta \tau}{V_{w_3} (\rho c_p)_{w_3}} A_{w_3}$$

La diffusivité thermique peut être estimée par

$$a_{w_1} = \frac{\lambda_{w_1}}{(\rho c_p)_{w_1}} = \frac{a_{65} e_{w_1} V_{w_1}}{\Delta \tau A_{w_1}} = \frac{a_{65} e_{w_1}^2}{\Delta \tau}$$

et par

$$a_{w_3} = \frac{\lambda_{w_3}}{(\rho c_p)_{w_3}} = \frac{a_{67} e_{w_3} V_{w_3}}{\Delta \tau A_{w_3}} = \frac{a_{67} e_{w_3}^2}{\Delta \tau}$$

Pour 4 des échantillons considérés, les résultats sont les suivants :

Echantillons	a_{66}	a_{65}	a_{67}	$a_{w_1} 10^6 \text{ (m}^2/\text{S)}$	$a_{w_3} 10^6 \text{ (m}^2/\text{S)}$
1	0.459	0.265	0.271	1.15	1.17
2	0.410	0.270	0.314	1.17	1.36
3	0.393	0.277	0.324	1.20	1.41
4	0.474	0.245	0.277	1.06	1.20

Tableau 4.1. Paramètres estimés et diffusivité thermique

Ces résultats indiquent une valeur relativement homogène de la diffusivité thermique, toutefois supérieure à la valeur théorique pour le béton armé qui peut être calculée par :

$$a_{th} = \frac{1.7}{2400 \cdot 840} = 0.84 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Une explication relativement simple de l'obtention de ces valeurs plus élevées peut résider dans le fait que la conduction dans les parois accumulatives étudiées ne se fait pas de manière unidimensionnelle mais bien bi-dimensionnelle. La paroi est en effet constituée de profilés obliques par rapport à la façade et peut être difficilement assimilée à un mur de longueur infinie (fig. 4.5).

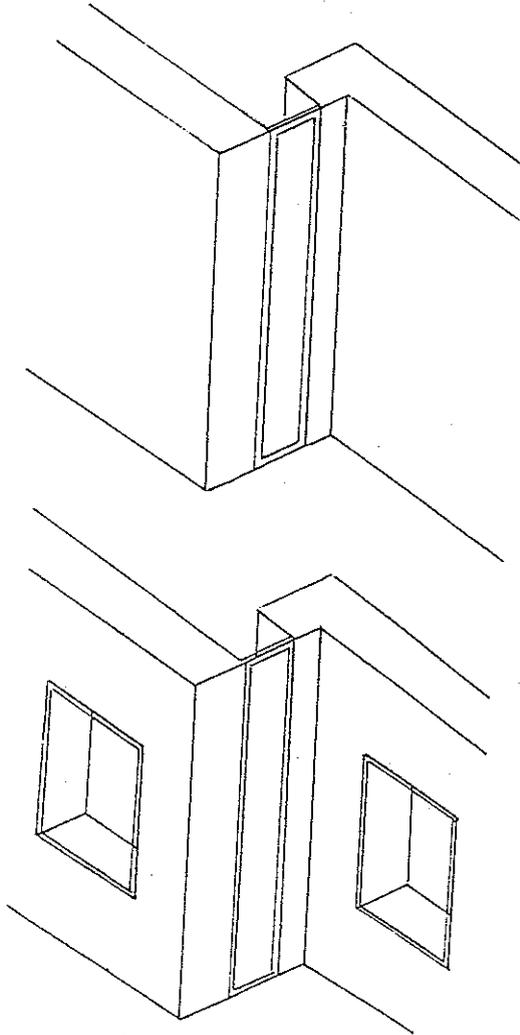


Fig. 4.5. Schéma d'un profilé du mur de masse

Ces conditions aux limites induisent un champ de température bi-dimensionnel. Les résultats de l'identification suggèrent que la représentation d'un tel milieu par un modèle unidimensionnel devrait adapter la valeur de la diffusivité thermique de façon à prendre en compte, de façon fictive, les phénomènes bi-dimensionnels (voir aussi 3.4.6) au travers d'une augmentation de la diffusivité thermique.

4.4.4.2. Identification du coefficient de convection à la surface du mur de masse, côté serre (noeud n° 4)

Le modèle relatif à ce noeud peut se réécrire de la façon suivante :

$$t_{w_0}(k) = \frac{-b_{42}}{a_{44}} t_{vi}(k) + \frac{-b_{43}}{a_{44}} t_a(k) + \frac{-b_{41}}{a_{44}} S(k) + \frac{-a_{45}}{a_{44}} t_{w_1}(k) \quad (4.53)$$

Le coefficient de convection à l'interface mur/serre s'exprime au moyen de la relation suivante :

$$h_c = \frac{b_{43}\lambda}{a_{45} e_{w_1}}$$

En supposant une valeur de λ conforme aux résultats précédents, l'estimation du coefficient de convection produit les résultats suivants (valeurs moyennes sur la période).

Echantillon	h_c ($W.m^{-2} . K^{-1}$)
1	7.8
2	7.2
3	6.5
4	9.1

Tableau 4.2. Estimation du coefficient de convection

Par ailleurs, l'évolution temporelle du coefficient de convection est disponible, puisque la procédure d'identification travaille de façon récursive. Voici, par exemple, l'évolution estimée pour l'échantillon n° 4, en relation avec l'intensité du rayonnement solaire disponible (fig. 4.6).

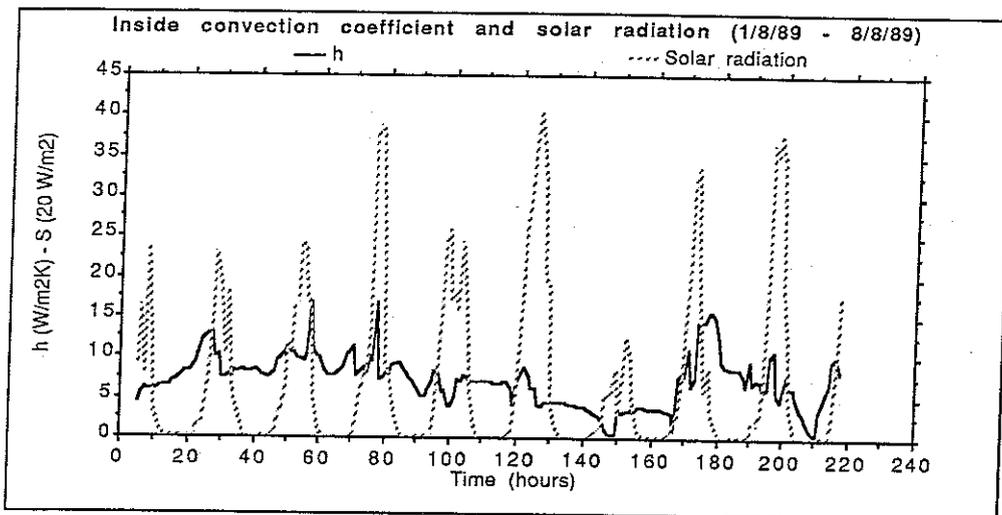


Fig. 4.6. Evolution du coefficient de convection

Cette figure met en évidence la corrélation entre la valeur du coefficient de convection et l'intensité du rayonnement solaire disponible. Cette corrélation suggère l'apparition de mouvements convectifs plus importants lorsque le niveau de l'ensoleillement augmente. On remarque toutefois que la valeur calculée évolue de part et d'autre d'une valeur moyenne relativement conforme à ce qui est admis classiquement en thermique du bâtiment ($8 \text{ W/m}^2\text{K}$). Enfin, il ne faut pas oublier que ce type de calcul apparaît très sensible aux erreurs de mesures.

Cette méthode constitue un exemple des méthodes de mesure "intelligentes" par association d'un capteur de mesure et d'une procédure de traitement qui, le cas échéant, pourrait être implantée en temps réel.

4.4.5. Identification de paramètres globaux du bâtiment

Une procédure d'identification a également été appliquée au modèle à 2 zones du bâtiment académique de la FUL présenté ci-dessus (paragraphe 3.2.) (André et al, 1989). Ce modèle s'exprime sous la forme d'un système de 4 équations différentielles en terme des 4 variables d'état sélectionnées : deux températures d'air et deux températures de parois. Pour les besoins de l'identification, il est nécessaire de recourir à une représentation entrée - sortie faisant intervenir les variables effectivement mesurées, à savoir les deux températures d'air.

L'élimination des températures des surfaces et de leurs dérivées dans le modèle d'état conduit aux deux équations différentielles du second ordre suivantes :

$$a_{12} \frac{d^2 t_{a_1}}{d\tau^2} + a_{11} \frac{dt_{a_1}}{d\tau} + a_{10} t_{a_1} + a_{21} \frac{dt_{a_2}}{d\tau} + a_{20} t_{a_2} = \quad (4.54)a$$

$$b_{11} \frac{dt_e}{d\tau} + b_{10} t_e + b_{21} \frac{dq_1}{d\tau} + b_{20} q_1 + b_{30} S$$

$$c_{22} \frac{d^2 t_{a_2}}{d\tau^2} + c_{21} \frac{dt_{a_2}}{d\tau} + c_{20} t_{a_2} + c_{11} \frac{dt_{a_1}}{d\tau} + c_{10} t_{a_1} = \quad (4.54)b$$

$$d_{11} \frac{dt_e}{d\tau} + d_{10} t_e + d_{21} \frac{dq_2}{d\tau} + d_{20} q_2 + d_{30} S$$

La relation entre les coefficients de ce modèle et les paramètres du modèle (4.50) est donnée en annexe (4.9.2). La discrétisation de ces équations conduit au système d'équations aux différences suivant :

$$\begin{aligned} & \alpha_{12} t_{a_1}(k+1) + \alpha_{11} t_{a_1}(k) + \alpha_{10} t_{a_1}(k-1) + \alpha_{21} t_{a_2}(k+1) + \alpha_{20} t_{a_2}(k) \\ & = \beta_{11} t_e(k+1) + \beta_{10} t_e(k) + \beta_{21} q_1(k+1) + \beta_{20} q_1(k) + \beta_{30} S(k) \end{aligned} \quad (4.55)a$$

$$\begin{aligned} & \gamma_{22} t_{a_2}(k+1) + \gamma_{21} t_{a_2}(k) + \gamma_{20} t_{a_2}(k-1) + \gamma_{11} t_{a_1}(k+1) + \gamma_{10} t_{a_1}(k) \\ & = \delta_{11} t_e(k+1) + \delta_{10} t_e(k) + \delta_{21} q_2(k+1) + \delta_{20} q_2(k) + \delta_{30} S(k) \end{aligned} \quad (4.55)b$$

La relation entre les paramètres de ce modèle et ceux du modèle précédent est également donnée en annexe (4.9.3).

Afin de donner un sens physique aux paramètres identifiés, il est utile de calculer l'expression théorique des constantes de temps de ces modèles. Le calcul s'opère à partir du polynôme caractéristique de chacune des fonctions de transfert.

Pour la première zone, le polynôme caractéristique est

$$\alpha_{12} z^2 + \alpha_{11} z + \alpha_{10}$$

et admet les racines suivantes :

$$z_{11}^{12} = \frac{-\alpha_{11} + \sqrt{\alpha_{11}^2 - 4\alpha_{12}\alpha_{10}}}{2\alpha_{12}}$$

Les constantes de temps associées à ces pôles sont :

$$T_{11} = \frac{\Delta \tau}{\ln z_{11}} \quad ; \quad T_{12} = \frac{\Delta \tau}{\ln z_{12}}$$

Le raisonnement est identique pour la seconde zone et conduit aux expressions suivantes pour les constantes de temps.

$$T_{21} = \frac{\Delta \tau}{\ln z_{21}} \quad ; \quad T_{22} = \frac{\Delta \tau}{\ln z_{22}}$$

avec

$$z_{21}^{22} = -\frac{\gamma_{21} + \sqrt{\gamma_{21}^2 - 4\gamma_{22}\gamma_{20}}}{2\gamma_{22}}$$

Appliquée à 4 échantillons parmi ceux récoltés sur le bâtiment de la FUL, la procédure conduit aux résultats suivants (ces résultats concernent la constante de temps principale exprimée en heure)

Période	T_{11} (h)	T_{21} (h)
1	1.2	18.7
2	2.1	22.7
3	2.7	21.2
4	1.9	88.1

Tableau 4.3. Constantes de temps principales des 2 zones thermiques

Les résultats montrent clairement la différence de comportement thermique dynamique des 2 zones. La zone à gain direct, très peu inerte, apparaît caractérisée par une constante de temps de l'ordre de 1 à 2 h. Par contre, la zone à gain indirect donne lieu à des constantes de temps d'une vingtaine d'heures au plus, ce qui traduit l'inertie thermique extrêmement importante des locaux équipés du mur de masse. La très grande sensibilité de la constante de temps

principale par rapport aux coefficients du polynôme caractéristique, explique la dispersion de l'estimation pour la zone à gain indirect.

4.4.6. Synthèse des résultats

Les deux exemples présentés ci-dessus mettent en évidence un certain nombre de problèmes et de réalités à prendre en compte lors de l'application de techniques d'identification.

- L'estimation des paramètres constitue une opération à très grande sensibilité. Par conséquent, la précision des mesures introduites dans l'algorithme est capitale pour la bonne suite des opérations. Comme cela est souvent le cas en physique de la mesure, les valeurs mesurées sont caractéristiques du capteur plutôt que du milieu à mesurer. Le modèle dynamique obtenu est également relatif au capteur plutôt qu'au milieu dans lequel il se trouve.
- La procédure d'identification produit (en utilisant un algorithme récursif tel que "RELS") des paramètres à valeurs variables dans le temps. Dans certains cas, les paramètres possèdent réellement une essence variable (coefficients de convection par exemple). Dans d'autres cas, la valeur théorique est constante (conductivité thermique par exemple) et une variabilité temporelle importante peut être associée à la sélection d'un modèle non adéquat.
- Dans certains cas, la procédure d'estimation engendre des valeurs négatives pour certains paramètres, ce qui est contraire à certains principes fondamentaux de la physique, comme le second Principe de la thermodynamique. Afin de satisfaire automatiquement ce Principe, il pourrait être fait usage d'un algorithme d'optimisation travaillant sous contraintes.
- Dans les deux exemples proposés, les systèmes dynamiques étudiés étaient représentés par des systèmes différentiels couplés. Or, l'algorithme d'identification utilisé ne traite que des systèmes à sortie unique. Par conséquent, l'identification a été réalisée en découplant les différentes équations du modèle. Ceci peut conduire à des valeurs différentes pour un même paramètre physique suivant l'équation considérée. Une façon de remédier à ce problème consiste par exemple à utiliser un algorithme travaillant sur la représentation d'état complète, par exemple le Filtre de Kalman.

4.4.7. Identification sur modèle d'état par application du Filtre de Kalman

Dans le but de remédier aux inconvénients mentionnés ci-dessus, le Filtre de Kalman a été utilisé afin de réaliser une estimation simultanée des paramètres relatifs à différents noeuds du modèle du mur de masse.

Les calculs ont été effectués au moyen du logiciel CYPROS (Camo, 1989) dont deux modules (EXKALM et KALMAX) sont basés sur le Filtre de Kalman. Le module EXKALM réalise une estimation de l'état d'un système non linéaire multivariable par application d'un Filtre de Kalman étendu. Le même module peut réaliser une estimation de paramètres inconnus si ceux-ci sont considérés comme des variables d'état supplémentaires. Le module KALMAX réalise une estimation des paramètres d'un système non linéaire multivariable par application de la méthode du Maximum de Vraisemblance. Le Filtre de Kalman est alors utilisé afin de produire un processus d'innovation "blanc" et distribué selon une loi normale afin de générer les conditions conformes aux hypothèses de la méthode du Maximum de Vraisemblance.

Le Filtre de Kalman a, dans un premier temps, été appliqué au modèle du mur de masse décrit en 4.3.2. Ce modèle contient 16 paramètres qui, par les contraintes physiques, peuvent se ramener à 13 paramètres physiques. Ce nombre demeure trop important pour espérer obtenir des résultats fiables.

Pour cette raison, l'algorithme a été appliqué à une partie du modèle, à savoir la partie "serre" du mur de masse. Le modèle considéré constitue une extension du réseau nodal de la figure 3.3. En effet, la partie "serre" a été divisée en deux zones caractérisées chacune par une température d'air (t_{a_1} et t_{a_2}). Par ailleurs, le modèle tient compte d'un couplage convectif avec la zone "hall" et d'un couplage radiatif avec la zone "room". Il est représenté à la figure 4.7.

Equation d'état :

$$t_{a_1}(k+1) = p_1 t_{a_1}(k) + p_2 t_{ext}(k) + p_3 t_{a_2}(k) + p_4 t_{ground}(k) + p_5 t_{hall}(k) + p_6 T_{w0}(k) + p_7 t_{room}(k) \quad (4.56)a$$

Equation de sortie :

$$t_{s_1}(k) = t_{s_1}(k) + p_8 s_v(k) \quad (4.56)b$$

Les paramètres p_1 à p_7 de ce modèle sont reliés aux coefficients d'échange physiques par un jeu de relations données en annexe (voir 4.9.4).

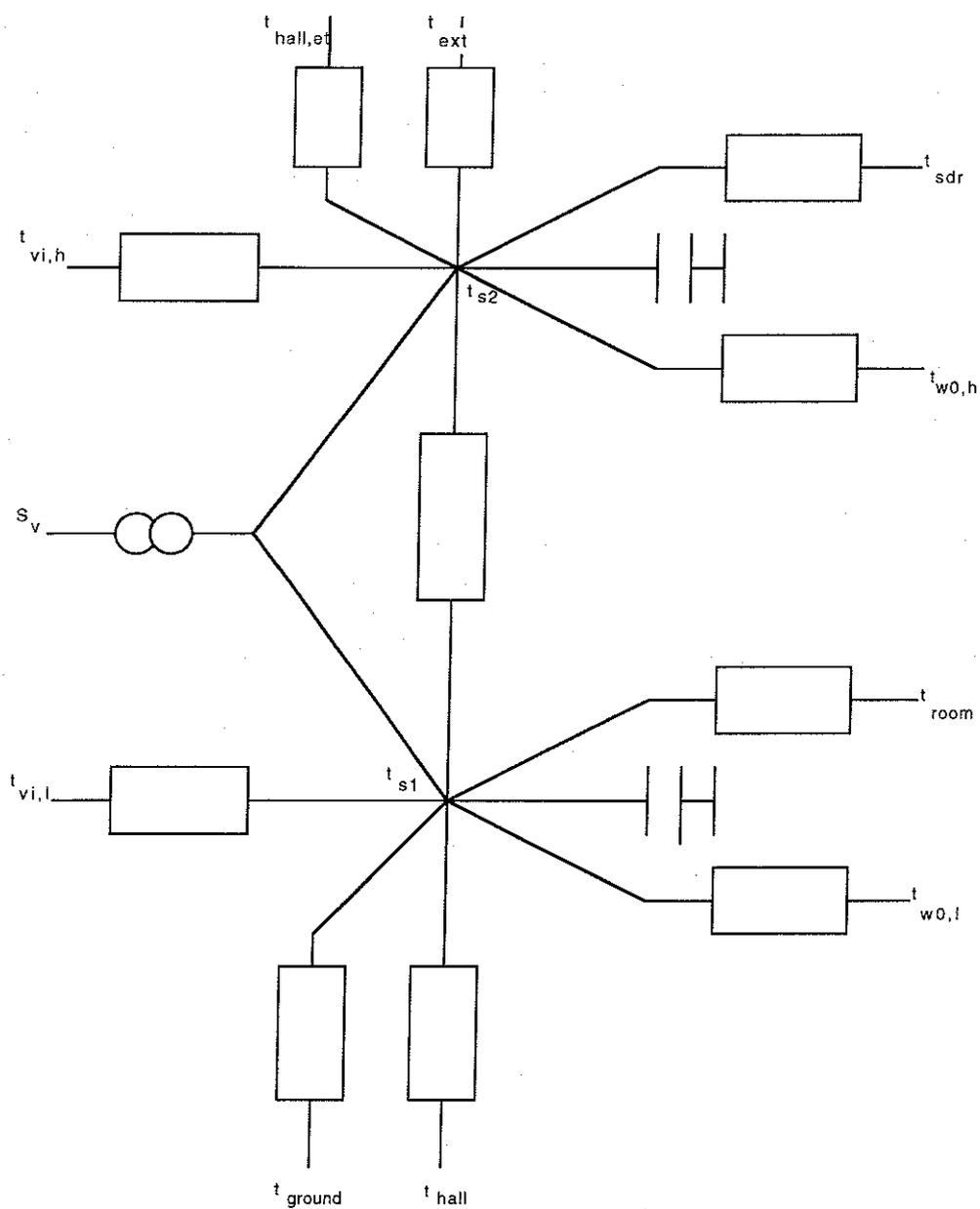


Fig. 4.7. Modèle nodal (à 2 noeuds) de la serre

Par ailleurs, une distinction a été opérée entre t_{s1} , température réelle de l'air de la serre et t'_{s1} , température mesurée avec un effet d'ensoleillement par l'intermédiaire d'un paramètre p_8 qui quantifie l'absorption solaire du capteur de mesure.

Ce modèle permet dès lors de prendre en compte l'effet perturbateur du rayonnement solaire sur la sonde.

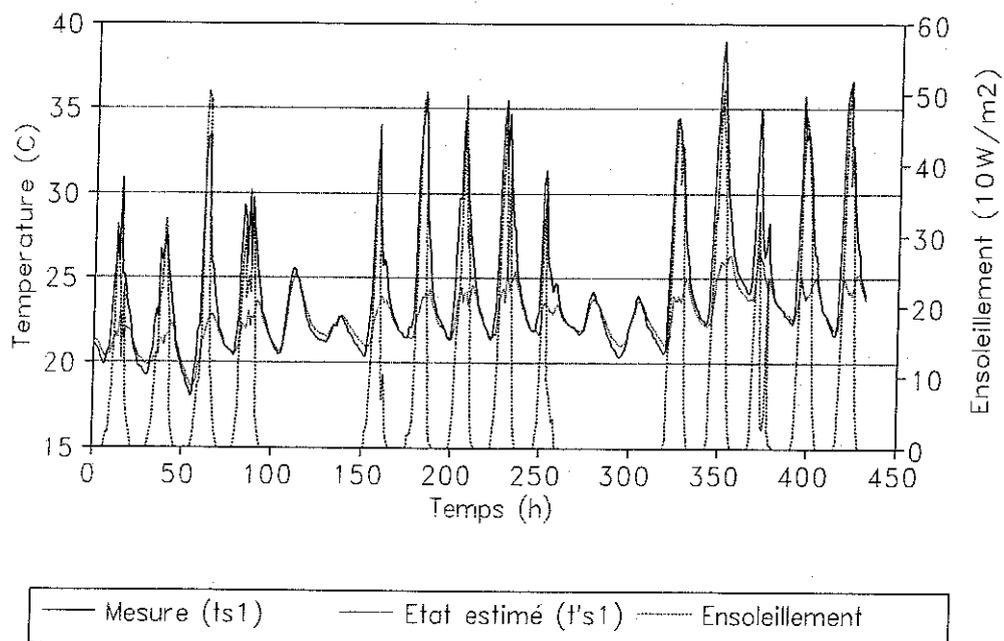


Fig. 4.8. Comparaison de différentes températures dans la serre

L'estimation des paramètres par le Filtre de Kalman ne produit pas de résultats intéressants. Il en va autrement de l'estimation des variables d'état. La figure 4.8 montre à ce titre une comparaison entre t'_{s1} (variable d'état du modèle) et t_{s1} (température mesurée). On remarque un excellent accord entre les 2 grandeurs lorsque l'ensoleillement est inférieur à une certaine valeur (périodes nocturnes ou périodes d'acclination des volets). Dès que l'ensoleillement dépasse un certain seuil, la valeur mesurée s'éloigne de l'estimation d'état, qui elle n'est pas affectée par l'ensoleillement.

Tout comme il n'existe pas de technique de mesure "directe" d'un coefficient d'échange, il apparaît virtuellement impossible de mesurer, sans commettre d'erreur, une température d'air dans un milieu soumis à un ensoleillement important. La construction d'un modèle du système à mesurer (prenant en compte les erreurs de mesure) et l'utilisation d'un algorithme d'estimation d'état tel que le Filtre de Kalman procurent, ainsi qu'il est montré ci-dessus, une technique intéressante où modèle et mesure se complètent pour aboutir à une information de meilleure qualité.

4.5. APPLICATION DE LA THÉORIE DE LA COMMANDE OPTIMALE À LA THERMIQUE DU BÂTIMENT

Une autre voie d'utilisation de la théorie des systèmes en thermique du bâtiment, et en particulier des modèles développés au paragraphe 4.3, réside dans l'utilisation de la théorie de la commande optimale pour déterminer des stratégies de contrôle efficaces en matière d'utilisation rationnelle de l'énergie et de confort. Cette approche a été tentée dans l'étude du bâtiment académique de la FUL pour lequel les résultats du monitoring avaient mis en évidence un manque d'efficacité et de coordination entre les différents systèmes de contrôle.

4.5.1. Introduction

Tout comme pour l'identification, l'application de la théorie de la commande optimale à la thermique du bâtiment a donné lieu à de nombreux développements.

Les premières recherches ont utilisé la théorie du contrôle optimal déterministe (voir 4.2.4) (Bloomfield et Fisk, 1977), (Winn et Winn, 1985), (Rosset et Benard, 1986), (Parent et Morand, 1987), (Lebru et Visier, 1987), (Benard et al, 1987) (Zaheer-Udin, 1992). Entre autres méthodes, une application du Principe d'optimisation quadratique est proposée par Visier et al (1990) et Zhao et Visier (1991). L'étude de stratégie de contrôle de type "Bang-bang" a reçu l'attention de Burns et al (1991). Un problème typiquement d'actualité et d'importance considérable est constitué par le calcul des séquences optimales de démarrage et d'arrêt des systèmes de chauffage (Dexter, 1981), (Kohonen et al, 1991), (Madjidi et Stephan, 1991). Enfin, de nouvelles tendances sont fournies par l'application de la théorie du contrôle optimal stochastique (Scartezzini et al, 1987a) (Nygard-Fergusson et Scartezzini, 1989a), (Nygard-Fergusson et Scartezzini, 1989b), (Nygard-Fergusson et Scartezzini, 1991) qui s'appuie sur des modèles stochastiques markoviens (Scartezzini et al, 1987b), (Scartezzini et al, 1989), (Nygard-Fergusson et Scartezzini, 1989c) et par l'application de la logique floue (Glennec, 1991).

4.5.2. Application de la méthode à un local (grand auditoire) du bâtiment académique de la FUL

La méthode exposée ci-dessus a été appliquée dans le cadre de l'étude approfondie menée sur le bâtiment académique de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise à Arlon (André et al, 1991 b). Afin de limiter la complexité du traitement, l'objectif s'est restreint à étudier un local de ce bâtiment, à savoir le local dénommé "grand auditoire" situé à l'arrière du mur de masse évoqué plus haut (paragraphe 4.3.2). L'objectif de l'étude était de déterminer une stratégie de contrôle qui optimise l'influence des apports solaires passifs (par l'intermédiaire du mur de masse) de façon à réduire au maximum la dépense énergétique.

L'étude s'est déroulée dans le contexte de la simulation numérique, un modèle complexe de bâtiment simulant l'effet de la stratégie de commande appliquée. Afin de réaliser la connexion du contrôleur optimal et du modèle de bâtiment, le choix s'est porté sur le logiciel modulaire TRNSYS (University of Madison, 1990). Dans ce contexte, différents "types" compatibles avec ce logiciel ont été développés (André, 1992d) :

- un type "Contrôleur optimal" implémentant le calcul de la commande optimale par application du Principe du Maximum
- un type "Filtre de Kalman" calculant une estimation de l'état du système contrôlé, requise par le contrôleur mais non disponible au niveau du modèle du bâtiment
- un type "Prévision de perturbations" réalisant une prévision à court terme de l'évolution des perturbations (variables météorologiques, températures adjacentes, gains internes)
- un type "Générateur de consigne" permettant de transmettre un profil de consigne donné au régulateur optimal

L'intégration de ces composants au sein du logiciel TRNSYS sera décrite au chapitre 5 (simulation).

La connexion de ces différents composants entre eux et avec le composant "Bâtiment Multizone" (type 56 de la version 13.0 de TRNSYS) est représentée à la figure 4.9.

Le local à contrôler apparaît extrêmement inerte, de par la présence d'un mur de masse en façade sud. Il est partiellement enterré, ce qui augmente la surface en contact avec le sol. Des vitrages intérieurs permettent une petite proportion de gain solaire direct dans le local. Le local est en connexion directe avec l'environnement extérieur, le sol, la serre située en façade sud, le hall central du bâtiment, les locaux de l'étage. Le local et ses parois sont soumis à l'action de trois variables de commande :

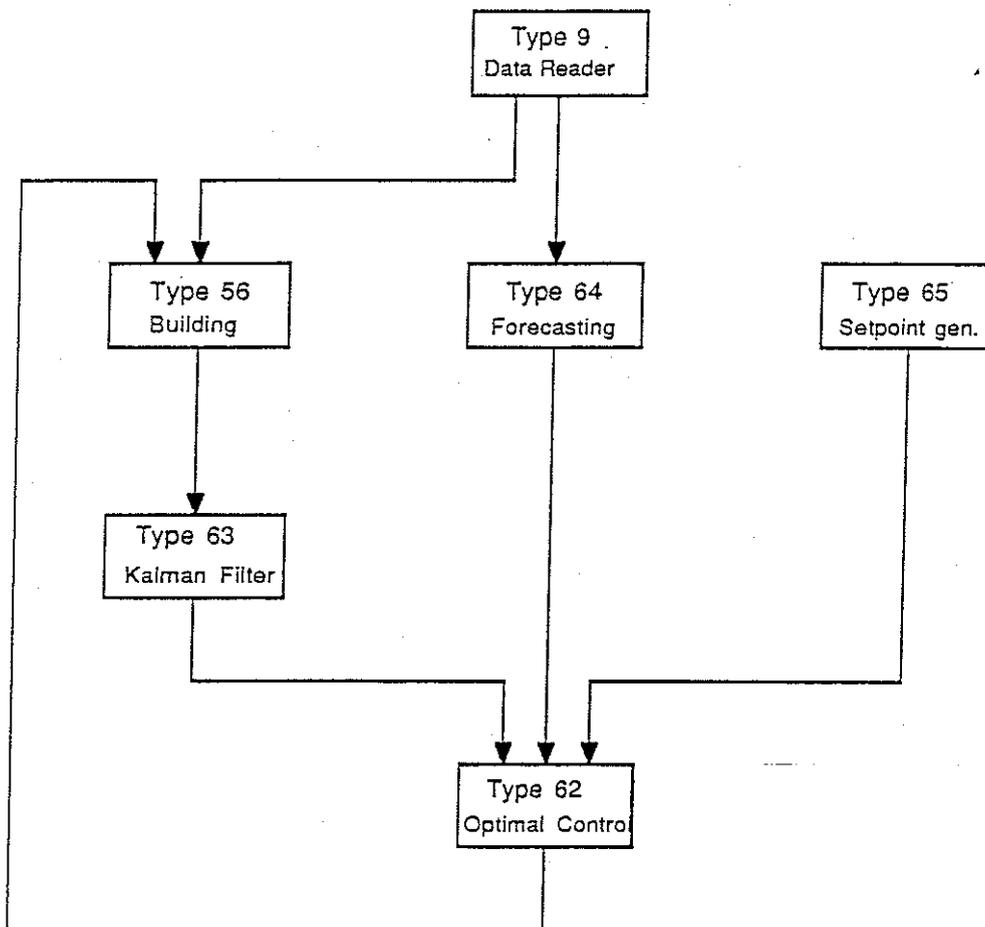


Fig. 4.9. Connexion des composant TRNSYS

- 1 commande en chauffage par l'action de radiateurs
- 1 commande en refroidissement par l'action d'un système de ventilation mécanique à température/débit constants
- 1 commande en occultation par l'action d'un système de volets en façade sud

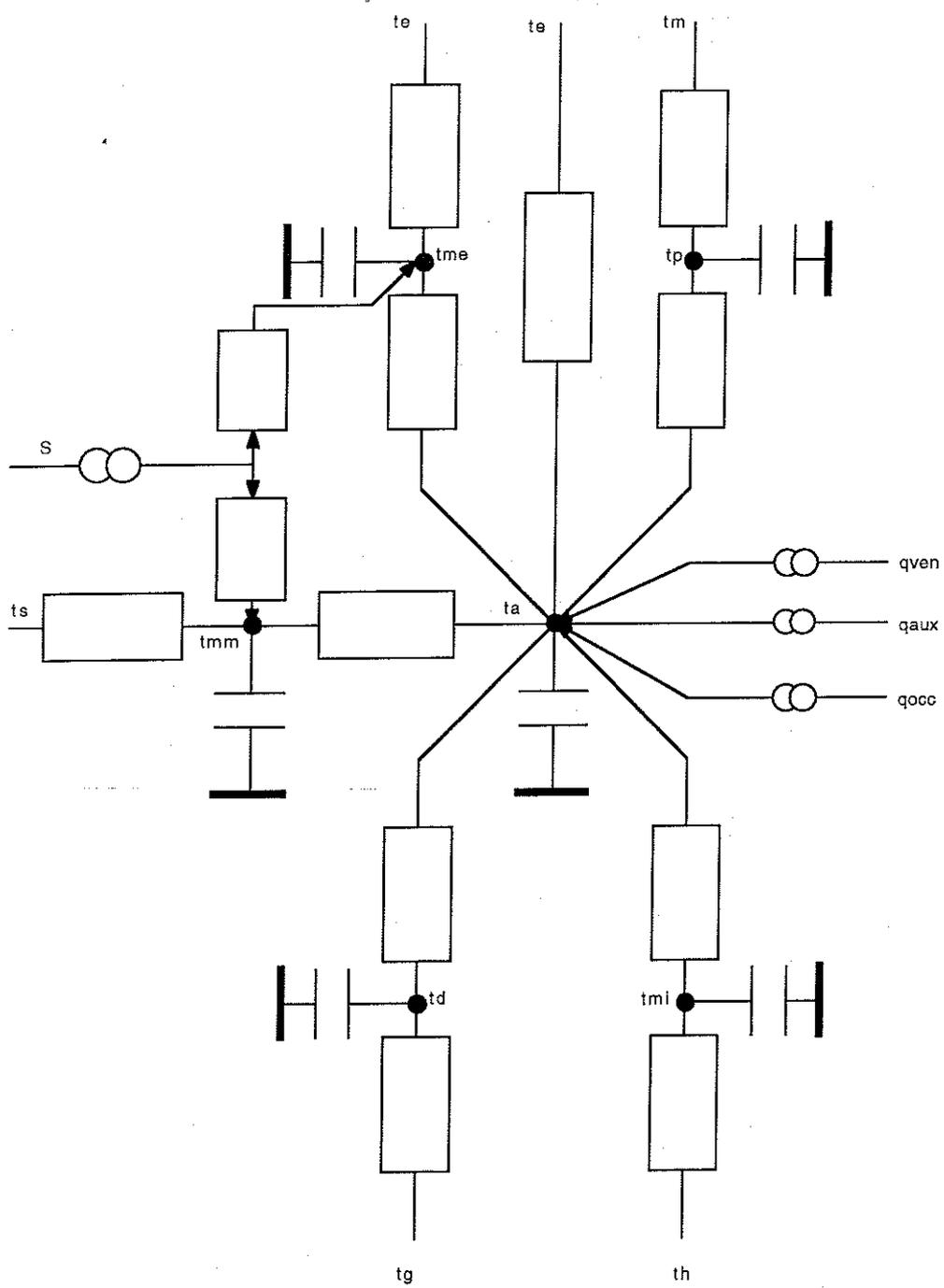


Fig. 4.10. Modèle nodal du grand auditoire

Le profil d'occupation du local est très intermittent : le local est occupé très intensivement (environ 100 personnes) une fois par semaine. Le profil de consigne correspond néanmoins à un horaire de type bureaux (0817 h). La puissance maximale des systèmes de chauffage et de refroidissement est respectivement de 10 kW (chaud) et de 4 kW (froid).

Un modèle modal du local a été développé en suivant le formalisme présenté au paragraphe 4.3. Chaque paroi a été modélisée par un système d'ordre 1. Ensuite, les différentes parois ont été assemblées entre elles pour produire le schéma nodal global représenté à la figure 4.10 :

Ce modèle contient :

- 6 variables d'état
 - $x_1 =$ température de l'air (t_a)
 - $x_2 =$ température du mur de masse (t_{mm})
 - $x_3 =$ température du plancher (t_d)
 - $x_4 =$ température du mur intérieur (t_{mi})
 - $x_5 =$ température du plafond (t_p)
 - $x_6 =$ température du mur extérieur (t_{me})

- 3 variables de contrôle :
 - $u_1 =$ chauffage (q_{aux})
 - $u_2 =$ ventilation (q_{ven})
 - $u_3 =$ occultation

- 8 variables perturbatrices
 - $v_1 =$ température extérieure (t_e)
 - $v_2 =$ température des locaux de l'étage (t_m)
 - $v_3 =$ température de la serre (t_s)
 - $v_4 =$ température du sol (t_g)
 - $v_5 =$ température du hall (t_h)
 - $v_6 =$ gains internes (q_{occ})
 - $v_7 =$ ensoleillement en façade sud (S_s)
 - $v_8 =$ ensoleillement en façade nord (S_n)

A partir de ces éléments, il est possible de construire la représentation d'état et cette construction aboutit aux matrices A, B et E de l'équation 4.3. Pour plus de détails, le lecteur se référera à André et Nicolas (1992).

La période sélectionnée pour l'étude est une séquence de journées du mois de mars (conditions de demi-saison). Le profil d'occupation du bâtiment reproduit aussi fidèlement que possible les conditions réelles : occupation intensive une fois par semaine, horaire de consigne de type bureaux, coupure du système de chauffage pendant le week-end, activation nocturne des volets.

Les figures 4.11 et 4.12 reproduisent quelques résultats typiques de calcul de la loi de commande optimale.

La figure 4.11 montre les courbes de chauffe optimale pour différentes journées et différents profils d'occupation.

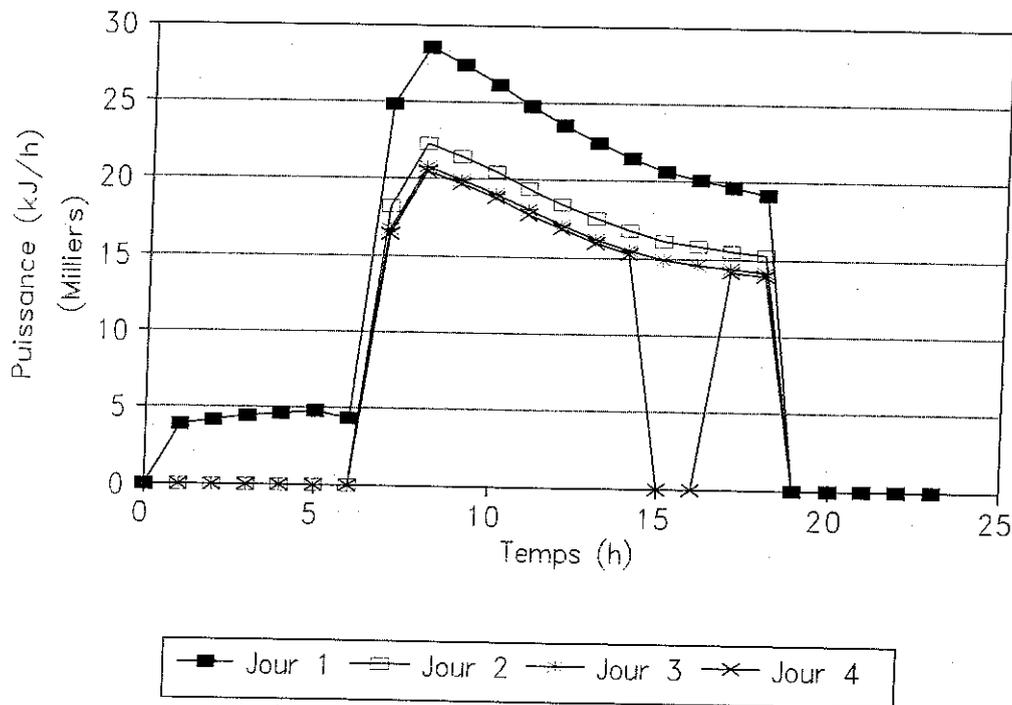


Fig. 4.11. Courbes de chauffe optimales

La figure 4.12 montre l'évolution de la température contrôlée pour les mêmes journées.

Cette figure met en évidence que la valeur de consigne n'est pas respectée et qu'une sous-chauffe caractéristique apparaît dans le local. Les résultats montrent que l'image de la température contrôlée est différente si elle est "observée" depuis le modèle simplifié (représentation d'état interne au régulateur) ou depuis le modèle complexe (fig. 4.13). Cette différence est due à la non-prise en compte de l'entièreté du comportement dynamique du système par le modèle simplifié. Cette modélisation imparfaite peut avoir deux causes : soit les coefficients des matrices du modèle d'état sont mal ajustés, soit l'ordre réduit de ce modèle est inapte à reproduire le comportement dynamique du système.

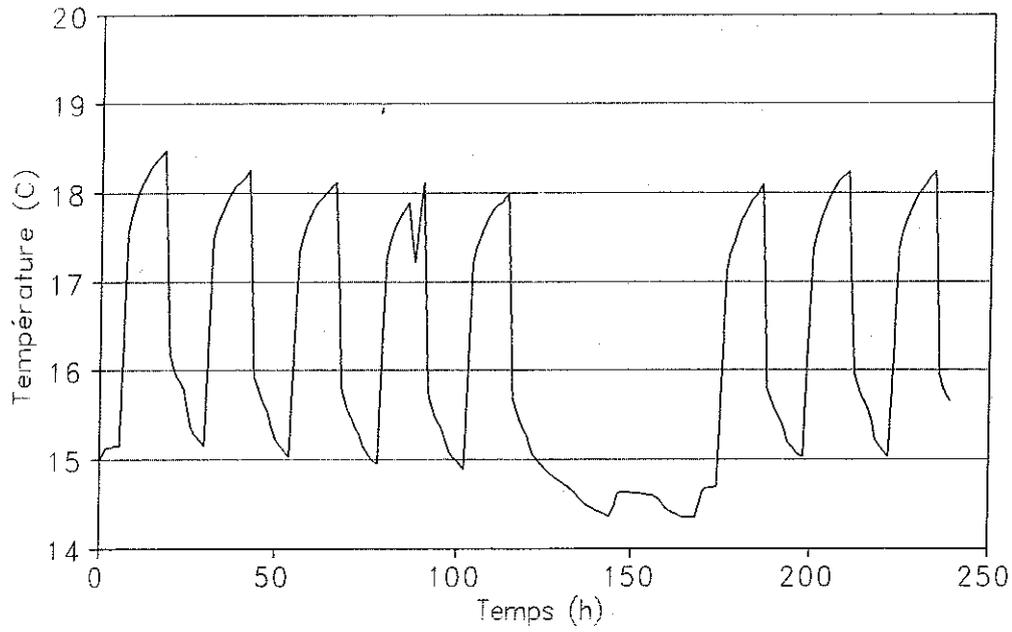


Fig. 4.12. Température avec commande optimale

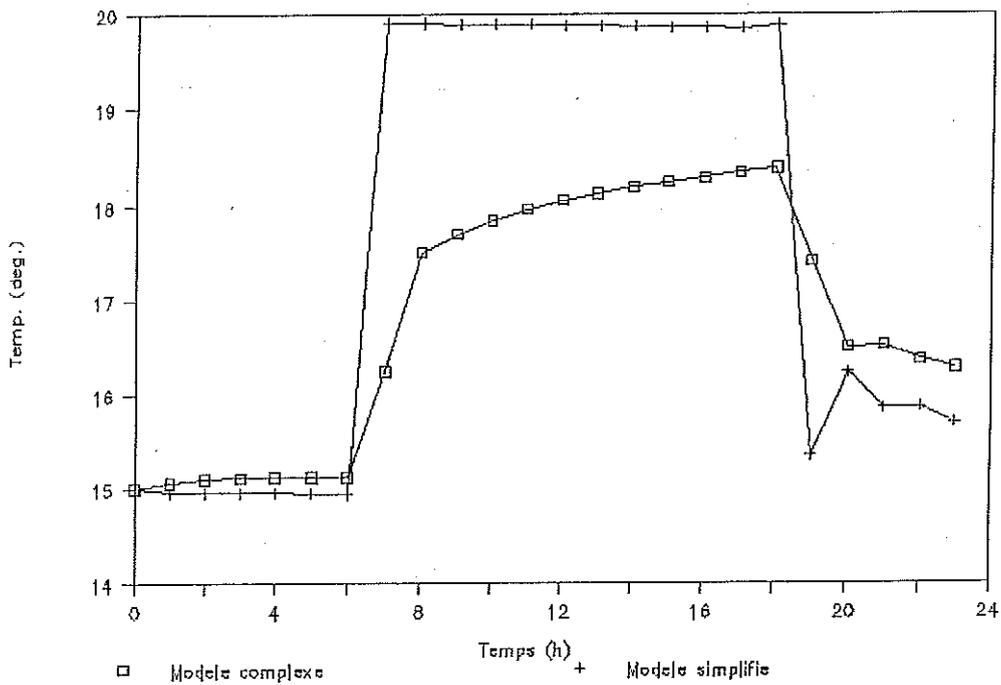


Fig. 4.13. Comparaison modèle complexe / modèle simplifié

4.5.3. Conclusions sur l'application de la commande optimale

La procédure relatée ci-dessus montre que la théorie des systèmes constitue un outil particulièrement intéressant en vue de calculer une stratégie de commande optimale. La méthode permet en effet de tenir compte d'un contexte multivariable (existence de plusieurs variables d'état, action de multiples variables de commande et de grandeurs perturbatrices) qu'il est absolument impossible d'intégrer dans des boucles de régulation classique, par exemple à base de contrôleurs "PID". La méthode permet de plus de prendre en compte, de façon anticipative, l'influence de grandeurs perturbatrices, par exemple des conditions climatiques. L'efficacité de cette prise en compte repose évidemment sur la qualité de la prédiction réalisée par l'algorithme d'anticipation. Ce problème n'a pas du tout été soulevé dans le cadre de ce travail, où l'on a supposé une prédiction parfaite des grandeurs perturbatrices sur l'horizon en vue d'optimisation. Quoique non réaliste, cette façon de faire permet de fixer une borne supérieure aux possibilités du système. L'applicabilité de la méthode repose d'abord sur la parcimonie utilisée lors du développement du modèle : l'augmentation du nombre de variables complique fortement les conditions de convergence de l'algorithme itératif (4.48).

Les résultats présentés ci-dessus ont mis de plus en évidence la nécessité impérative de disposer d'un bon modèle du système à contrôler afin de calculer une commande optimale effective. Si le modèle est inexact ou imprécis, le contrôleur n'aura qu'une image imparfaite de la réalité. Jusqu'à présent, la qualité du modèle est dépendante de l'adéquation du calcul "a priori". Par ailleurs, il existera toujours un risque non négligeable que le modèle calculé, même à partir d'une méthode très performante, ne reflète pas la réalité : la constitution des parois n'est pas toujours connue a priori, la mise en oeuvre des matériaux peut modifier substantiellement les propriétés thermiques du bâtiment, certains phénomènes énergétiques peuvent avoir été modélisés de façon imprécise ou incomplète.

Toutes ces raisons font qu'il serait peut-être judicieux de disposer d'un mécanisme de rétroaction entre le bâtiment ou son modèle détaillé et le modèle d'état simplifié sur lequel se base le calcul de la commande optimale. Cette nécessité débouche sur la "technologie" des systèmes adaptatifs qui constitue une synthèse convergente des trois volets examinés jusqu'à présent : modélisation, identification et contrôle.

4.6. PERSPECTIVES GÉNÉRÉES PAR LA THÉORIE DES SYSTÈMES ADAPTATIFS

Discipline de la théorie des systèmes en pleine expansion, la théorie des systèmes adaptatifs a la propriété de regrouper, dans une seule démarche, les trois directions proposées jusqu'à présent : modélisation, identification et contrôle. Les applications dans le domaine de la thermique du bâtiment sont encore très ponctuelles (Hegetschweiler, 1987), (Madjidi et Stephan, 1991) même si la théorie repose à présent sur des bases solides (Aström, 1983), (Aström et Wittenwark, 1989), (Ljung et Gunnarsson, 1990).

De cette théorie, se dégagent les 3 approches possibles de commande adaptative :

- le "Gain Scheduling" ou adaptation du gain du régulateur (fig. 4.14)
- le "Model Reference Adaptive System" ou (MRAS) (fig. 4.15)
- le "Self Tuning Regulator" (STR) (fig. 4.16)

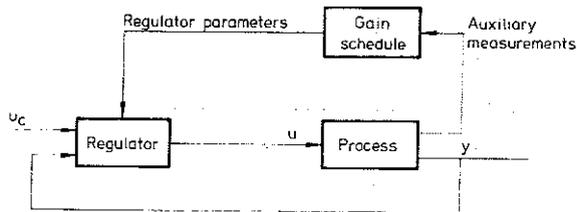


Fig. 4.14. Contrôle adaptatif par "Gain scheduling"

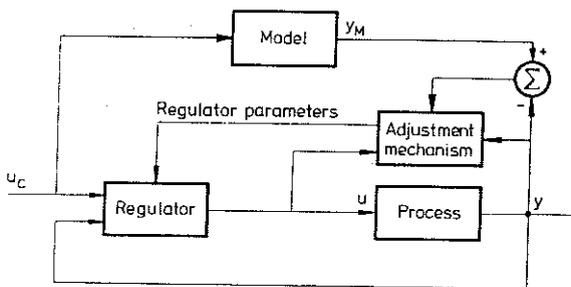


Fig. 4.15. Méthode MRAS de contrôle adaptatif

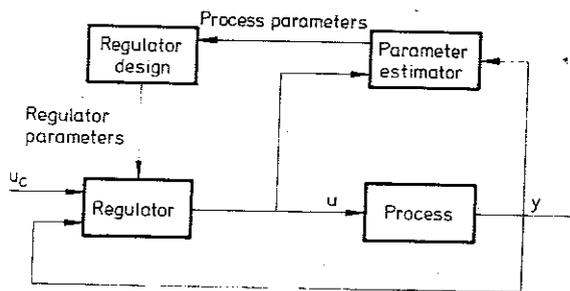


Fig. 4.16. Méthode STR de contrôle adaptatif

Dans la méthode "STR", l'innovation apportée par la composante adaptative réside dans la présence d'un algorithme d'estimation de paramètres. En fonction du formalisme de représentation choisi pour le modèle, cet estimateur peut être un Filtre de Kalman (représentation d'état) ou un des algorithmes évoqués au paragraphe 4 (représentation entrée/sortie). L'objet de la méthode est d'estimer, en temps réel, un modèle précis et fiable du système à contrôler et de communiquer cette connaissance au module calculant la loi de contrôle optimale. Cette façon de faire permet, théoriquement, de tenir compte de :

- caractéristiques du bâtiment mal connues, voire inconnues a priori
- caractéristiques du bâtiment variables dans le temps

Dans le cadre de ce travail, la méthode "STR" a été implémentée sous forme d'un module compatible avec le logiciel TRNSYS. L'estimation des paramètres y est réalisée par un Filtre de Kalman qui réalise également une estimation de l'état du système. Cette dualité d'estimations engendre de sérieux problèmes de convergence numérique qui rendent le système de contrôle insuffisamment robuste.

4.7. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT

4.7.1. Introduction

Le caractère universel du formalisme présenté dans ce chapitre induit une utilisation de la théorie des systèmes dans toutes les disciplines scientifiques. En effet, une fois posé dans les termes et dans le cadre de cette théorie, un problème peut recevoir l'application d'un nombre impressionnant de méthodes et de techniques dont le bien-fondé d'un point de vue théorique

n'apparaît plus à démontrer. La problématique environnementale n'a pas échappé à cette diffusion. Le caractère pluridisciplinaire et la taille des systèmes traités dans les problèmes d'environnement font même de la théorie des systèmes un support idéal d'aide à la réflexion et à la décision. Les problèmes d'environnement peuvent en effet très souvent s'exprimer en termes de flux, de transfert, de croissance, de contrôle, tous termes correspondant à des notions mathématiques figurant au coeur même de la théorie. La taille et le nombre des systèmes manipulés dans une seule étude environnementale contraignent l'utilisateur à manipuler des modèles simplifiés, d'ordre réduit, aisément interprétables pour des non-mathématiciens. Le problème de la réduction et de la simplification de modèles apparaît dès lors crucial. Par ailleurs, le milieu environnemental ne peut se dissocier de la notion de mesure (voir chapitre 2). Dès lors, les techniques d'identification trouvent dans les nombreuses données accumulées dans ce type d'approche, la matière première idéale pour faire de l'outil mathématique le support précis, rigoureux, solide que requiert toute analyse un tant soit peu fouillée. Enfin, les innombrables boucles de régulation et de rétroaction qui existent dans la nature pouvant être prises en compte par la masse d'outils et de connaissances accumulées par les automaticiens en théorie de contrôle. Le caractère évolutif des systèmes vivants, au coeur de la problématique environnementale, justifiera même le recours aux avancées les plus récentes de la théorie dans le domaine des systèmes adaptatifs. Le paragraphe suivant va illustrer ces propos en délivrant une série d'exemples appartenant à ce contexte.

4.7.2. Quelques exemples

Les premières applications de la théorie des systèmes aux problèmes d'écologie et d'environnement ont concerné des problèmes de dynamique de la population et ce, pour des espèces animales ou végétales. Les problèmes les plus simples abordent l'étude d'une seule espèce, en relation avec les paramètres de l'environnement. Ainsi, Williams, (1971) analyse la dynamique d'une population microbienne (*Chlorella Selenastrum*). L'auteur construit un modèle "mécanistique" (ie de connaissance) et tente de représenter, avec un succès impressionnant, le comportement dynamique de l'ensemble du système. Le modèle est en effet confronté à l'expérience par l'application de sollicitations de type "échelon" et "onde carrée". Deux types complémentaires de modèles sont développés, l'un traitant les propriétés intensives, l'autres les propriétés extensives de la population.

Hubbell (1971) présente une étude bioénergétique de l'isopode terrestre "*Armadillidium*" en utilisant certains concepts de la théorie du contrôle et des fonctions de transfert. L'auteur développe trois modèles du contrôle de l'énergie par cette espèce : deux modèles linéaires et un autre qui ne l'est pas. Ces modèles sont développés dans l'espace de Laplace, ce qui peut sembler désuet mais constitue néanmoins pour l'époque, une des premières approches dans le cadre des problèmes écologiques. La figure 4.17 montre le schéma bloc d'un des modèles développés.

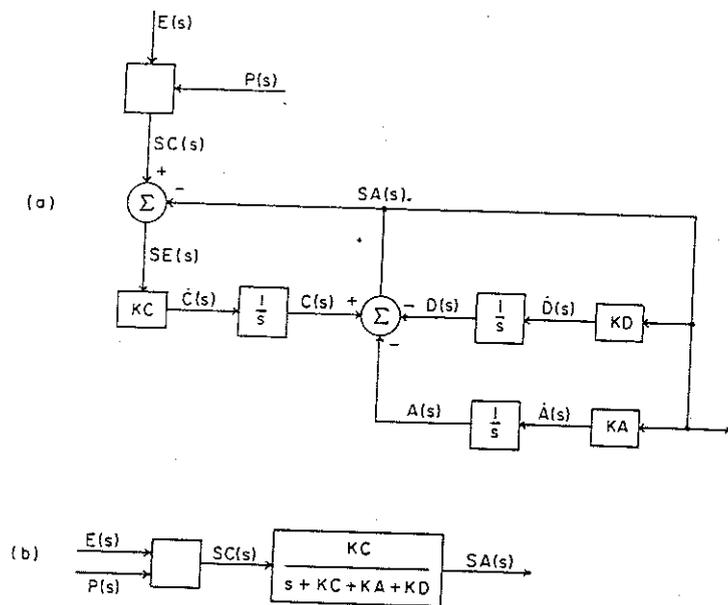


Fig. 4.17. Schéma-bloc d'un modèle bioénergétique linéaire

D'autres approches abordent des écosystèmes plus complexes en considérant les couplages et les interactions qui existent entre les différents composants de l'environnement. Brylinsky (1972) étudie un écosystème marin du point de vue des flux énergétiques, Child et Shugart (1972) analysent, par des méthodes fréquentielles, le cycle du magnésium dans un écosystème forestier tropical. Saila (1972) applique la théorie des systèmes à des problèmes de pêche.

L'analyse de "Biomes" ou "unités de paysage typiques" aux USA a également reçu l'appui de la théorie des systèmes. Imis (1975) présente le rôle des modèles pour l'étude du Biome herbager; O'Neill (1975) modélise le Biome "Désert" tandis que l'étude de Miller et al (1975) concerne le Biome "Toundra". Enfin, le Biome "Forêt conifère" est étudié par Overton (1975).

Les biotopes aquatiques sont caractérisés par une foule de problèmes extrêmement complexes d'un point de vue écologique. En particulier les écosystèmes de type "estuaire" qui font l'objet des études de Wiegert (1975), Boling et al (1975), Patton et al (1975), Di Toro et al (1975), Cher et Orlob (1975), Trelly (1976), Walsh et Howe (1976), O'Brien et Wroblewski (1976).

Dans un autre registre d'applications, les écosystèmes "terrestres" mettent également en évidence le rôle de l'interaction entre les espèces. Lugo et al (1976) analysent le rôle des interactions entre espèces dans la réponse d'un écosystème forestier à des perturbations sur l'environnement, survenant à différentes périodes de la vie de la forêt. Sollins et al (1976) simulent également un écosystème forestier situé en Oregon.

La théorie des systèmes ne se contente pas d'analyser les écosystèmes animaux et végétaux. L'écosystème humain reçoit également l'attention de nombreuses équipes de recherche. La discipline entre ainsi de plein pied dans le domaine de la cybernétique.

La figure 4.18 montre un modèle cybernétique des interactions entre les processus de décisions humaines avec la géosphère, la biosphère et l'activité humaine (Koenig, 1976).

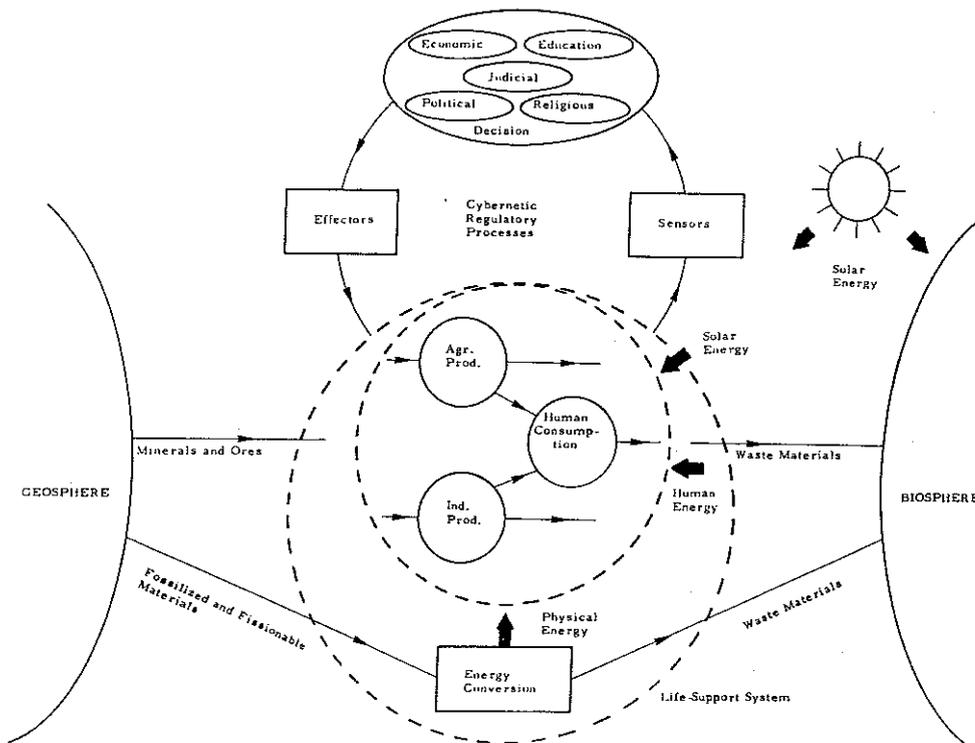


Fig. 4.18. Modèle cybernétique des relations homme-environnement (extrait de Koenig (1976))

Dans une perspective encore plus large, certains auteurs tentent même de modéliser le monde dans sa globalité (Mc Leod, 1976). Pensons aux modèles élaborés par le "Club de Rome" : World II, World Dynamics, World III et "The limits to growth". Il va sans dire que ces modèles apparaissent extrêmement ambitieux. A l'opposé de ce type d'approche, extrêmement globale et macroscopique, d'autres auteurs, par exemple Odum (1976) développent des modèles à échelle réduite ("Minimodèles") pour représenter les interactions Homme-Nature, caractéristiques de tout problème environnemental. Pour prendre une

connotation artistique, ces modèles produisent une vue "impressionniste" de la réalité et essaient de réduire la complexité des phénomènes naturels.

Comme on peut le voir à la lumière de ces exemples, le spectre d'applications de la théorie des systèmes s'étend sur toute la gamme des problèmes naturels. Ceci justifie le caractère universel de la dite théorie et renforce son potentiel d'utilisation. Néanmoins, les problèmes environnementaux présentent des caractéristiques spécifiques qu'il convient d'observer et de prendre en compte avant d'appliquer la théorie. Le paragraphe suivant tente de réaliser un survol rapide de ces problèmes spécifiques.

4.7.3. Spécificités des problèmes environnementaux

La taille, la complexité, la pluridisciplinarité des problèmes environnementaux engendrent des contraintes spécifiques sur l'utilisation de la théorie des systèmes. Ce problème de l'applicabilité de cette théorie se pose dès lors à une toute autre échelle que pour les problèmes physiques ou industriels que la discipline a abordé dans un premier élan. Dans la suite de ce paragraphe, nous aborderons successivement les problèmes liés à la taille des systèmes, à la validité de l'hypothèse linéaire, à l'agrégation de modèles, au contrôle, à la sensibilité et à la stabilité des systèmes.

4.7.3.1. Taille des systèmes

Le paragraphe précédent a effleuré ce problème. Ces situations environnementales donnent lieu à des analyses situées dans un cadre très large. De nombreux intervenants doivent être pris en compte, de même que les interactions qui existent entre eux. Les exemples donnés ci-dessus ont dégagé deux tendances dans la façon d'appréhender cette difficulté de façon réaliste: soit on considère des modèles globaux, extrêmement étendus et on fait appel aux méthodes spécifiques de la théorie des "grands" systèmes; soit on se concentre sur une partie seulement du système au risque de perdre de vue la connexion et l'interdépendance entre les composants du système étudié. L'analyse des relations entre sous-systèmes apparaissant comme fondamentale, parce que caractéristique du problème dans son essence, il semble que la tendance se dirige vers la première solution.

4.7.3.2. Linéarité

Il est probable qu'aucun phénomène dans la réalité des choses ne soit purement linéaire. Cependant, l'hypothèse de linéarité est souvent posée. La théorie des systèmes et ses

algorithmes font en effet état d'une applicabilité grandement facilitée dans les situations linéaires : les méthodes disponibles deviennent beaucoup plus nombreuses et leur usage nettement facilité. La question de la validité de l'hypothèse de linéarité apparaît encore plus cruciale pour les systèmes environnementaux parce que la complexité des phénomènes naturels remet en cause leur caractère linéaire. Bledsoe (1976) pose le problème dans des termes extrêmement généraux et montre que le fait de linéariser un système non linéaire (opération le plus souvent réalisée par troncature d'un développement en série de Taylor au 1er ordre) peut modifier le point d'équilibre du système et entraîner l'instabilité asymptotique du modèle. Dans de tels cas, la restriction de la validité du modèle linéaire à un domaine autour du point de l'espace d'état où la linéarisation a été réalisée apparaît encore plus cruciale que pour d'autres systèmes. Ces précautions opérationnelles mises à part, le choix idéal réside évidemment dans un compromis dépendant à la fois du critère en fonction duquel le choix doit s'opérer et de l'objectif assigné au modèle. Bledsoe (1976) présente une matrice de choix (tableau 4.4) en fonction de 8 critères et de 3 objectifs.

- Critères :
1. Facilité de construction
 2. Disponibilité des données
 3. Respectabilité scientifique
 4. Compréhension de l'écosystème
 - 5.a Difficulté mathématique : Construction du modèle
 - 5.b Difficulté mathématique : Solution numérique
 - 5.c Difficulté mathématique : Analyse du modèle

- Objectifs :
1. Enseignement
 2. Gestion
 3. Recherche

	Enseignement	Gestion	Recherche
Facilité de construction	L	D	D
Disponibilité des données	L	N	N
Respectabilité scientifique	N	N	N
Compréhension de l'écosystème	N	N	N
Construction du modèle	L	N	N
Solution numérique	D	D	D
Analyse du modèle	D	D	D

Tableau 4.4. Choix d'un modèle linéaire ou non linéaire
(L : linéaire; N : non linéaire; D : indifférent)

4.7.3.3. Agrégation de modèles

Le problème de l'agrégation de modèles a déjà été évoqué lors de la problématique de la réduction des modèles en vue de l'obtention de modèles simplifiés (voir 4.2.2.2). Zeigler (1976) a posé le problème dans des termes théoriques et extrêmement formels, basés sur la reconsidération du concept d'équation d'état dans une optique de théorie des ensembles. Selon cet auteur, un modèle d'état (simplifié) constitue une agrégation d'un modèle d'état plus complexe si et seulement si il existe une relation d'homomorphisme entre les deux, qui se traduit par la conservation de la fonction de transfert et de la relation "entrée-sortie". La spécificité des problèmes environnementaux implique un certain nombre de conséquences. Tout d'abord, la complexité de ces problèmes engendre la nécessité de disposer d'une collection de modèles cohérents et organisés dans une structure hiérarchisée. Ensuite, le niveau de détail apporté par ces modèles doit dépendre de l'objectif poursuivi et les concepts d'homomorphisme et d'agrégation sont à même d'apporter une contribution à l'imbrication relative des différents modèles. Enfin, la structure ainsi créée doit permettre le choix d'un modèle adapté à l'application envisagée.

Dans toute cette problématique, la théorie dépasse de loin la pratique à l'heure actuelle.

4.7.3.4. Contrôle

La théorie du contrôle a connu un essor extraordinaire au cours des 30 dernières années et s'est vue appliquée à des problèmes techniques de plus en plus nombreux et divers. La discipline s'étend même jusqu'aux problèmes de régulation de l'écosystème même si la spécificité structurelle de ceux-ci engendre la nécessité de disposer de techniques adéquates. Comme déjà évoqué à maintes reprises, la difficulté de l'application des théories classiques provient de la grande taille des systèmes abordés, de la remise en cause fréquente de l'hypothèse de linéarité et du fait de l'importance prépondérante des variables perturbatrices sur les variables de commandes dans les modèles d'écosystèmes (pensons par exemple aux variables météorologiques). Afin d'aborder ces problèmes, les techniques spéciales deviennent nécessaires. Mulholland et Sims (1976) proposent une méthode de contrôle des grands systèmes permettant de réduire un problème d'optimisation complexe en un problème plus simple, posé en termes d'un nombre limité de variables.

Partant du système

$$\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, \underline{u}) \quad (4.57)$$

on définit un nombre limité de variables \underline{y} ($\dim \underline{y} < \dim \underline{x}$)

$$\underline{y} = \rho(\underline{x}) \quad (4.58)$$

qui se comportent selon une loi donnée :

$$\underline{\dot{y}} = g(\underline{y}, \underline{v}) \quad (4.59)$$

où \underline{v} est un vecteur de contrôle auxiliaire qui minimise la fonctionnelle

$$J = \int_{t_1}^{t_f} L(\underline{y}, \underline{v}) dt \quad (4.60)$$

La résolution du problème d'optimisation aboutit à une équation algébrique :

$$h = (\underline{x}, \underline{u}) = \Psi(\underline{x}, \underline{v}) \quad (4.61)$$

qu'il suffit de résoudre par rapport à \underline{u} pour obtenir la commande à appliquer au système. L'avantage de cette méthode réside dans son applicabilité aux systèmes tant linéaires que non-linéaires, sous certaines conditions de plein rang imposées à certaines matrices du système (Rhoten et Mulholland, 1974). D'un point de vue philosophique, cette méthode se rapproche de la technique adaptative "MRAS" (voir (4.6)) dans la mesure où la commande à appliquer au système est calculée à partir de la spécification d'un modèle auxiliaire (4.59) contraint à avoir un comportement dynamique donné. La correspondance (4.58) entre les variables du modèle de référence et celles du modèle de départ implique que celui-ci se comportera également de la manière souhaitée. Enfin, la dépendance marquée de l'état du système par rapport aux nombreuses perturbations l'affectant peut être prise en compte par une dépendance explicite de l'équation d'état par rapport au temps (fonction "f" variable dans (4.57)). Dans ces conditions, les outils de la théorie "classique" du contrôle peuvent servir à l'analyse de la régulation des écosystèmes.

4.7.3.5. Sensibilité et stabilité

Ces deux concepts apparaissent étroitement liés l'un à l'autre dans la mesure où la trop grande sensibilité d'un système peut déboucher sur son instabilité.

D'une manière générale, la stabilité d'un système recouvre différentes réalités : stabilité asymptotique ou non des systèmes libres (ou stabilité au sens de Lyapounov); stabilité "BIBO" (entrée bornée - sortie bornée) des systèmes bornés, stabilité par rapport aux variations de paramètres (qui rejoint le concept de sensibilité). Les méthodes disponibles pour quantifier la stabilité et la sensibilité d'un système apparaissent aussi nombreuses que précises (Méthodes de Lyapounov, lieux des racines, critères de Nyquist, critère de Routh-Hurwitz ou de Schur-Cohn). La difficulté introduite par l'application de ces méthodes aux écosystèmes réside dans la définition et la modélisation de ce système, dans la

commandabilité réduite par rapport à la complexité du système, dans l'existence de boucles de régulation internes au système, mal identifiées voire totalement inconnues (Conrad, 1976). En contrepartie de ces inconvénients, la majorité des écosystèmes apparaissent stables, précisément à cause de la présence de structures autorégulatrices (principe d'homéostasie). Tout le problème consiste à déterminer dans quelles limites ce principe reste acquis. Il s'agit bien d'un problème crucial et qui justifie à lui seul l'utilisation de méthodes de la théorie des systèmes dans la mesure où aucun autre outil n'est à même d'approcher la question de la stabilité d'un écosystème. Par exemple, les soubresauts climatiques de ces dernières années ne constitueraient-ils pas le signe avant-coureur d'une entrée en instabilité du système planétaire? Seule une analyse de la stabilité d'un modèle suffisamment riche et exact pourrait permettre de répondre à cette question.

L'analyse de la sensibilité d'un modèle d'écosystème aux variations de ses paramètres apparaît également extrêmement féconde (Waide et Webster, 1976). En effet, ce type d'analyse permet d'aider à la construction du modèle, d'analyser l'effet des erreurs sur la valeur des paramètres, de prévoir l'effet d'un changement de paramètres sur le comportement du système, de déterminer quel paramètre doit être connu avec quelle précision et de comprendre le fonctionnement interne des écosystèmes. Par exemple, une analyse de sensibilité permet de déterminer le degré de connexion existant entre deux composants d'un écosystème. Cependant, la spécificité des problèmes environnementaux peut engendrer une dépendance temporelle du phénomène de sensibilité, ce qui implique une approche mettant en oeuvre des modèles dynamiques de sensibilité.

4.8. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre a tenté de mettre en évidence la puissance et la richesse de la théorie des systèmes afin d'appréhender une gamme très étendue de problèmes. Cette théorie à plusieurs facettes développe des méthodes dans le domaine de la modélisation simplifiée de systèmes, de l'identification de paramètres et du contrôle. Illustrée par des exemples de la thermique du bâtiment, les différents algorithmes peuvent se voir transposés pour l'analyse des problèmes environnementaux, en l'occurrence les écosystèmes. Ces systèmes présentent cependant un certain nombre de caractéristiques spécifiques motivant la prise de précautions particulières : taille des systèmes, non-linéarité manifeste, hiérarchisation et agrégation des modèles, difficulté de contrôle, sensibilité et stabilité mal maîtrisées. En dépit de ces difficultés, la théorie apparaît devoir jouer un rôle de premier plan dans l'intégration des processus d'expérimentation et de modélisation des phénomènes environnementaux. (fig. 4.19)

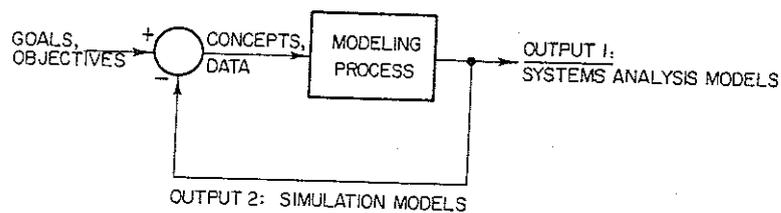


Fig. 4.19. Intégration des processus d'expérimentation et de modélisation par l'analyse des systèmes

En particulier, l'analyse des systèmes joue un rôle capital dans l'amélioration du crédit apporté aux processus de simulation numérique dans la mesure où elle établit une passerelle entre le modèle et la réalité au travers d'une structure mathématique souple et rigoureuse. Le chapitre suivant illustrera ce rôle important de l'analyse des systèmes.

4.9. ANNEXES DU CHAPITRE 4

4.9.1. Signification physique des coefficients du modèle (4.51)

$$a_{11} = -h_{ve} - U_V - \varepsilon_{ve} \varepsilon_{sky} F'_{ve,sky} \sigma$$

$$a_{12} = U_V$$

$$a_{22} = -h_{vi} - U_V - \varepsilon_{vi} \varepsilon_{w_o} \sigma F'_{vi,w_o}$$

$$a_{21} = U_V$$

$$a_{23} = h_{vi}$$

$$a_{24} = \varepsilon_{vi} \varepsilon_{w_o} \sigma F'_{vi,w_o}$$

$$a_{23} = 1 - \frac{(A_{vi} h_{vi} + A_{w_o} h_{w_o} + (UA)_{ground} + (UA)_{roof}) \Delta \tau}{(\rho c_p)_A V_A}$$

$$a_{32} = \frac{A_{vi} h_{vi} \Delta \tau}{(\rho c_p)_A V_A}$$

$$a_{34} = \frac{A_{w_o} h_{w_o} \Delta \tau}{(\rho c_p)_A V_A}$$

$$a_{44} = -h_{w_o} - \frac{\lambda_{w_o}}{e_{w_o}} - \varepsilon_{w_o} \varepsilon_{vi} \sigma F'_{w_o,vi}$$

$$a_{45} = \frac{\lambda_{w_o}}{e_{w_o}}$$

$$a_{55} = 1 - \frac{\left(A_{w_o} \frac{\lambda_{w_o}}{e_{w_o}} + A_{w_1} \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} \right) \Delta \tau}{V_{w_1} (\rho c_p)_{w_1}}$$

$$a_{54} = \frac{A_{w_0} \frac{\lambda_{w_0}}{e_{w_0}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_1} V_{w_1}}$$

$$a_{56} = \frac{A_{w_1} \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_1} V_{w_1}}$$

$$a_{66} = 1 - \frac{\left(A_{w_1} \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} + A_{w_2} \frac{\lambda_{w_2}}{e_{w_2}} \right) \Delta \tau}{V_{w_2} (\rho c_p)_{w_2}}$$

$$a_{65} = \frac{A_{w_1} \frac{\lambda_{w_1}}{e_{w_1}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_2} V_{w_2}}$$

$$a_{67} = \frac{A_{w_2} \frac{\lambda_{w_2}}{e_{w_2}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_2} V_{w_2}}$$

$$a_{77} = 1 - \frac{\left(A_{w_2} \frac{\lambda_{w_2}}{e_{w_2}} + A_{w_3} \frac{\lambda_{w_3}}{e_{w_3}} \right) \Delta \tau}{V_{w_3} (\rho c_p)_{w_3}}$$

$$a_{76} = \frac{A_{w_2} \frac{\lambda_{w_2}}{e_{w_2}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_3} V_{w_3}}$$

$$a_{78} = \frac{A_{w_3} \frac{\lambda_{w_3}}{e_{w_3}} \Delta \tau}{(\rho c_p)_{w_3} V_{w_3}}$$

$$a_{88} = -h_{w_4} - \varepsilon_{w_4} \varepsilon_{\text{walls}} \sigma F'_{w_4, \text{walls}} - \frac{\lambda_{w_4}}{e_{w_4}}$$

$$a_{87} = \frac{\lambda_{w_4}}{\epsilon_{w_4}}$$

$$e_{11} = \alpha_{ve} F_g(\tau)$$

$$e_{12} = h_{ve}$$

$$e_{13} = \epsilon_{ve} \epsilon_{sky} F_{ve, sky} \sigma$$

$$e_{21} = \alpha_{vi} - (1 - \alpha_{ve} - \rho_{ve}) F_g(\tau)$$

$$e_{32} = \frac{(UA)_{roof} \Delta\tau}{(\rho c_p)_A V_A}$$

$$e_{34} = \frac{(UA)_{ground} \Delta\tau}{(\rho c_p)_A V_A}$$

$$b_{41} = \alpha_{w_o} \tau_{ve} F_g(\tau)$$

$$b_{42} = \epsilon_{w_o} \epsilon_{v_i} \sigma F_{w_o, v_i}$$

$$b_{43} = h_{w_o}$$

$$b_{86} = h_{w_4}$$

$$b_{87} = \epsilon_{w_4} \epsilon_{walls} \sigma F_{w_4, walls}$$

4.9.2. Relation entre les coefficients du modèle (4.54) et ceux du modèle (4.50)

$$a_{12} = \frac{C_{a_1}}{h_{i_1}}$$

$$a_{11} = \frac{h_{i_1} + h_{v_1} + h_{12}}{h_{i_1}} + \frac{C_{a_1}}{C_{s_1}} \frac{h_{e_1} + h_{i_1}}{h_{i_1}}$$

$$a_{10} = \frac{h_{e_1} + h_{i_1}}{C_{s_1}} \cdot \frac{h_{i_1} + h_{v_1} + h_{12}}{h_{i_1}} - \frac{h_{i_1}}{C_{s_1}}$$

$$a_{21} = -\frac{h_{12}}{h_{i_1}}$$

$$a_{20} = \frac{-(h_{e_1} + h_{i_1})}{C_{s_1}} \cdot \frac{h_{12}}{h_{i_1}}$$

$$b_{11} = \frac{h_{v_1}}{h_{i_1}}$$

$$b_{10} = \frac{h_{e_1} + h_{i_1}}{C_{s_1}} \cdot \frac{h_{v_1}}{h_{i_1}} + \frac{h_{e_1}}{C_{s_1}}$$

$$b_{21} = \frac{1}{h_{i_1}}$$

$$b_{20} = \frac{h_{e_1} + h_{i_1}}{C_{s_1}} \cdot \frac{1}{h_{i_1}}$$

$$b_{30} = \frac{\alpha_1}{C_{s_1}}$$

$$c_{22} = \frac{C_{a_2}}{h_{i_2}}$$

$$c_{21} = \frac{h_{i_2} + h_{v_2} + h_{12}}{h_{i_2}} + \frac{C_{a_2}}{C_{s_2}} \frac{h_{e_2} + h_{i_2}}{h_{i_2}}$$

$$c_{20} = \frac{h_{e_2} + h_{i_2}}{C_{s_2}} \cdot \frac{h_{i_2} + h_{v_2} + h_{12}}{h_{i_1}} - \frac{h_{i_1}}{C_{s_1}}$$

$$c_{11} = -\frac{h_{12}}{h_{i_2}}$$

$$c_{10} = \frac{-(h_{e_2} + h_{i_2})}{C_{s_2}} \cdot \frac{h_{12}}{h_{i_2}}$$

$$d_{11} = \frac{h_{v_2}}{h_{i_2}}$$

$$d_{10} = h_{e_2}$$

$$d_{21} = \frac{1}{h_{i_2}}$$

$$d_{20} = \frac{h_{e_2} + h_{i_2}}{C_{s_2}} \cdot \frac{1}{h_{i_2}}$$

$$d_{30} = \frac{\alpha_2}{C_{s_2}}$$

4.9.3. Relation entre les coefficients du modèle (4.55) et ceux du modèle (4.54)

$$\alpha_{12} = \frac{a_{12}}{(\Delta \tau)^2} + \frac{a_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\alpha_{11} = - \left(\frac{2 a_{12}}{(\Delta \tau)^2} + \frac{a_{11}}{\Delta \tau} - a_{10} \right)$$

$$\alpha_{10} = \frac{a_{12}}{(\Delta \tau)^2}$$

$$\alpha_{21} = \frac{a_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\alpha_{20} = a_{20} - \frac{a_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\beta_{11} = \frac{b_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\beta_{10} = b_{10} - \frac{b_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\beta_{21} = \frac{b_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\beta_{20} = b_{20} - \frac{b_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\beta_{30} = b_{30}$$

$$\gamma_{22} = \frac{c_{22}}{(\Delta \tau)^2} + \frac{c_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\gamma_{21} = - \left(\frac{2c_{22}}{(\Delta \tau)^2} + \frac{c_{21}}{\Delta \tau} - c_{20} \right)$$

$$\gamma_{20} = \frac{c_{22}}{(\Delta \tau)^2}$$

$$\gamma_{11} = \frac{c_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\gamma_{10} = c_{10} - \frac{c_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\delta_{11} = \frac{d_{11}}{\Delta \tau}$$

$$\delta_{10} = d_{10} - \frac{d_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\delta_{21} = \frac{d_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\delta_{20} = d_{20} - \frac{b_{21}}{\Delta \tau}$$

$$\delta_{30} = d_{30}$$

4.9.4. Relation entre les paramètres du modèle (4.56) et les coefficients d'échanges physiques

$$p_1 = 1 - \left[(UA)_{I2} + (hA)_{vi,1} + (UA)_{room} + (hA)_{w0,1} + (UA)_{hall} + (UA)_{ground} \right] \cdot \frac{\Delta\tau}{C_{S1}}$$

$$p_2 = \frac{(hA)_{vi,1} \Delta\tau}{C_{S1}}$$

$$p_3 = \frac{(UA)_{I2} \Delta\tau}{C_{S1}}$$

$$p_4 = \frac{(UA)_{ground} \Delta\tau}{C_{S1}}$$

$$p_5 = \frac{(UA)_{hall} \Delta\tau}{C_{S1}}$$

$$p_6 = \frac{(hA)_{w0,1} \Delta\tau}{C_{S1}}$$

CHAPITRE 5.

SIMULATION

5.1. INTRODUCTION

L'utilisation des modèles mathématiques trouve l'une de ses applications les plus fécondes dans le domaine de la simulation numérique. L'objet de cette discipline est de tenter de reproduire, au moyen de modèles, le comportement d'un système donné. L'avènement de l'outil informatique a évidemment donné une impulsion déterminante à l'utilisation de ces techniques, la prolifération de logiciels dédiés à cette tâche en atteste dans une grande mesure. La relative facilité d'emploi de ces outils (en tout état de cause, c'est la machine qui travaille) et la considération parfois mythique attachée à l'outil informatique ont toutefois engendré des conséquences assez négatives sur la pertinence de la technique. Les partisans diront leur totale confiance, parfois aveugle, dans les résultats issus des algorithmes de calcul; les adversaires avanceront, avec raison, leur scepticisme devant la trop grande perfection de ces mêmes résultats et leur discordance avec la réalité. Pour remédier à ces inconvénients et tenter de rapprocher les points de vue, une approche "intégrée" s'avère à nouveau nécessaire. C'est l'objet de ce chapitre, d'utiliser tous les acquis des chapitres précédents afin de conférer aux techniques de simulation numérique un rôle plus objectif, plus proche de la réalité du terrain tout en tirant parti de l'extraordinaire puissance de l'outil informatique.

Comme pour les chapitres précédents, la démarche sera préférentiellement illustrée sur des problèmes de thermique du bâtiment. Dans cette optique, après une présentation générale des différents outils de simulation disponibles dans ce domaine, les différentes phases préalablement requises pour une utilisation rationnelle de la simulation seront présentées : la validation du logiciel, sa calibration. Ensuite, le chapitre abordera les différentes utilisations possibles d'un logiciel de simulation : prédiction, analyse paramétrique, simulation de situations non mesurables, émulation. Quelques considérations relatives à l'extension d'un logiciel modulaire (TRNSYS) seront alors formulées. Enfin, la généralisation tentera de montrer dans quelle mesure la technique peut être utilisée dans d'autres problèmes environnementaux et les spécificités qui peuvent surgir de ces applications.

5.2. LES OUTILS DE SIMULATION DISPONIBLES EN THERMIQUE DU BÂTIMENT

5.2.1. Généralités

La simulation se distingue de la modélisation dans la mesure où son objectif est d'utiliser un modèle ou un ensemble de modèles sur un support informatique afin d'en extraire une information. Alors que la modélisation poursuit surtout le développement de modèles (ce qui peut très bien ne jamais dépasser le stade conceptuel), la simulation présuppose une implémentation de ces modèles (ie leur traduction dans un langage informatique) au sein d'un programme apte à générer la séquence de calculs sous-jacente à l'expression mathématique du modèle.

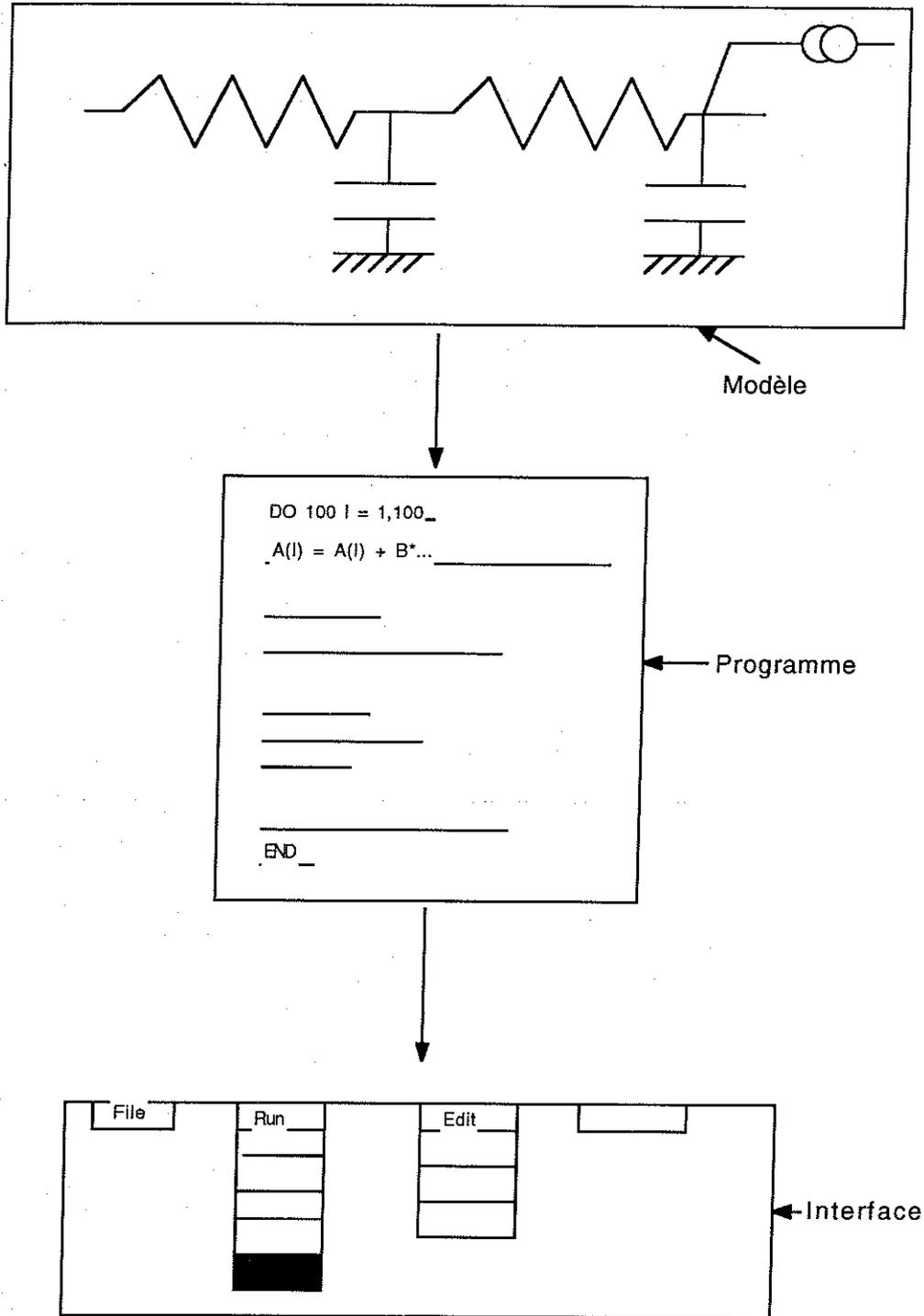


Fig. 5.1. Le modèle mathématique et le programme informatique

Cette implémentation implique le choix d'un langage, le codage des équations, l'alimentation du modèle en variables d'entrée et la production de variables de sortie, l'éventuelle connexion avec d'autres modèles, le choix d'un mécanisme (algorithme) de résolution des différentes équations, le développement d'une interface adéquate permettant une utilisation conviviale de l'outil. Comme on peut le voir, toutes ces opérations déplacent le centre de gravité du problème du modèle mathématique vers le programme informatique. Ce déplacement peut à lui seul expliquer les réserves formulées dans l'introduction : le programme informatique peut rapidement occulter le(s) modèle(s) qui en constitue(nt) néanmoins la partie fondamentale, celle sur laquelle la validité du résultats va reposer, derrière le voile de l'esthétique d'un écran (fig. 5.1).

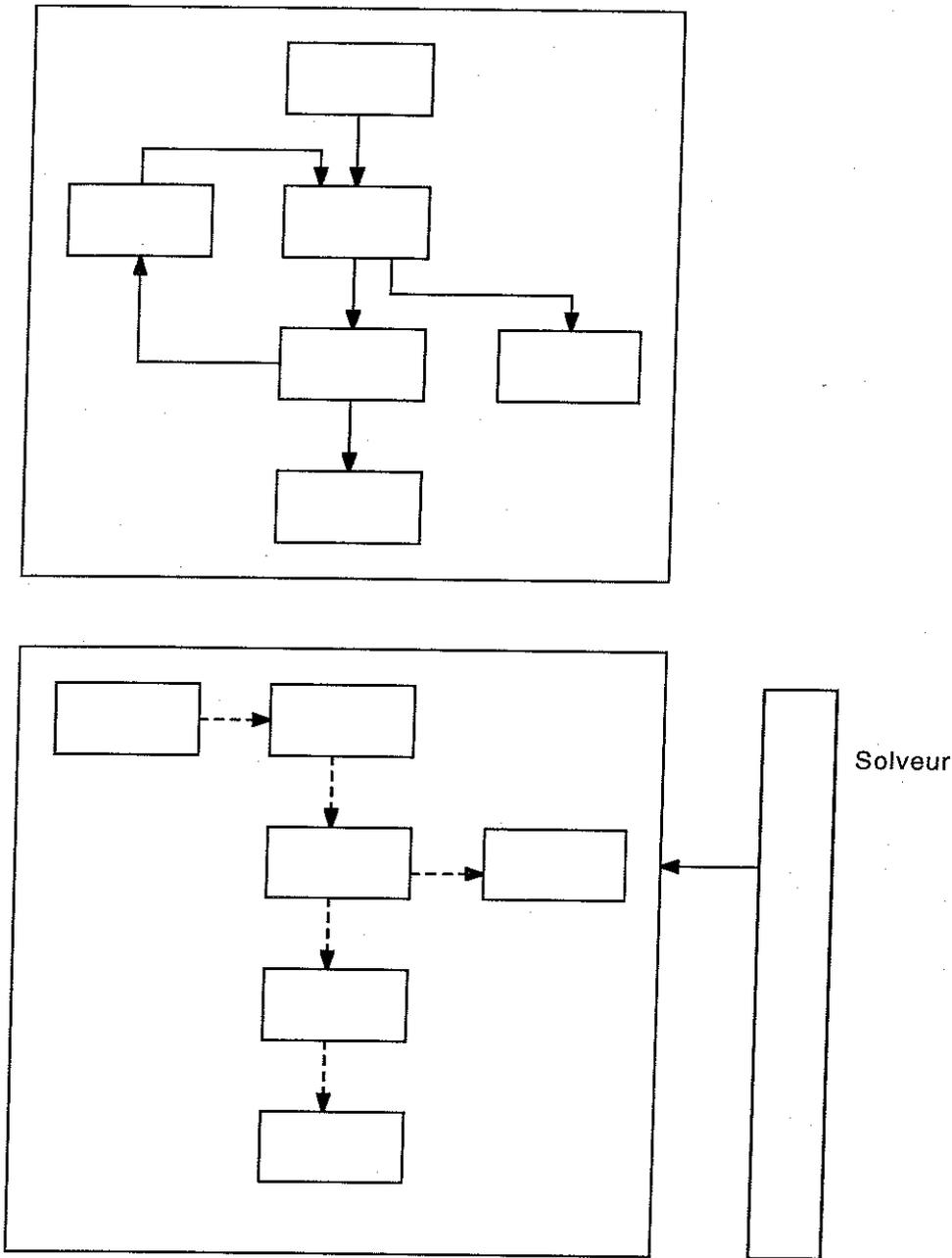
5.2.2. Logiciels de simulation en thermique du bâtiment

5.2.2.1. Classification

Les programmes de simulation en thermique du bâtiment poursuivent généralement l'objectif de reproduire, au cours du temps, le comportement thermique du bâtiment et/ou de ses équipements de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (HVAC). Ceci induit une première classification possible entre les différents codes : ceux simulant le bâtiment seul en considérant le système HVAC de façon idéalisée; ceux réalisant le couplage entre les deux types de composants.

Un autre critère de classification provient de la structure même des programmes. Certains de ceux-ci se présentent sous une forme que l'on peut qualifier de "monolithique" : le programme forme un tout cohérent, indissociable, irréductible à ses composants de base (fig. 5.2 a). Le couplage entre ces composants apparaît régi par le programme lui-même et tout à fait inaccessible du point de vue de l'utilisateur. D'autres programmes par contre se présentent comme une collection de modules indépendants assemblés au moment de l'exécution du logiciel. Ce couplage apparaît pris en charge par l'utilisateur et suppose la disponibilité d'un mécanisme (algorithme solveur) apte à reconnaître les couplages et à les prendre en compte au cours de la simulation (fig. 5.2 b).

Il est frappant de constater que les deux critères conduisent à des classifications relativement similaires (Augenbroe, 1987). En effet, la simulation conjointe du bâtiment et de ses équipements s'avère plus aisée à mettre en oeuvre au moyen d'un logiciel modulaire à cause de la plus grande dispersion des constantes de temps associées aux différents modèles et de la nature variable des interconnexions des composants à simuler. Par contre, la simulation d'un bâtiment seul pourra s'effectuer au moyen d'un logiciel monolithique.



-----> Liaison établie par l'utilisateur
 —————> Liaison établie par le programme

Fig. 5.2. Structure monolithique (a) et modulaire (b) des programmes de simulation

Les autres critères de classification concernent plutôt le type de modélisation qui est entreprise par les composants du programme : le bâtiment est-il considéré comme une seule zone thermique ou comme la conjonction de plusieurs zones ? Quels sont les phénomènes physiques qui sont pris en compte et ceux qui ne le sont pas ? Le bâtiment est-il simulé de façon statique ou dynamique ?

Cette classification sommaire nous permet de survoler les principaux outils disponibles et de détecter les différences qui existent entre eux.

5.2.2.2. Présentation de quelques logiciels

Le développement de logiciels a connu au cours des 20 dernières années un essor extrêmement important dans le domaine de la thermique du bâtiment, principalement dû aux incitations à la gestion rationnelle de l'énergie générées par la crise du pétrole. De par le monde, des centaines de codes ont vu le jour, les uns présentant des méthodes de calcul très simplifiées, les autres abordant de façon très détaillée et précise la simulation dynamique de bâtiments multizones et de leur équipement. Voici quelques uns des logiciels parmi les plus connus et les plus utilisés :

TRNSYS (University of Madison, 1990)

Logiciel de simulation du bâtiment et des équipements. Développé initialement pour des applications "solaires actives", le logiciel s'est étendu à une foule de composants les plus divers. Le programme apparaît modulaire et ouvert, c'est-à-dire que l'utilisateur a le loisir d'ajouter ses propres modules et de les connecter aux autres. Ce logiciel évolue constamment (version 13.1 sortie en septembre 1990, version 14.0 en préparation) et est distribué par l'Université de Madison - Wisconsin aux U.S.A.

HVAC Sim + (Clarck, 1985), (Clarck et May, 1985), (Park et al, 1986)

Le principal concurrent du précédent. Il présente les mêmes caractéristiques que TRNSYS et s'en distingue par un solveur un peu plus élaboré ("modsim") qui permet entre autres de hiérarchiser le système à simuler en fonction des caractéristiques dynamiques respectives des différents composants. Le logiciel apparaît également ouvert et modulaire, tout en étant moins orienté vers les applications solaires. Wang (1990) présente les adaptations nécessaires pour transférer un module de HVACSim + vers TRNSYS et réciproquement. HVACSim + est distribué par le National Bureau of Standards, US Department of Commerce, USA.

HVAC Dynamics (Novakovic et al, 1986)

Il s'agit également d'un programme modulaire de simulation du bâtiment (sous forme simplifiée) et de ses équipements. Sa particularité réside dans sa possibilité de connexion avec le logiciel CYPROS (voir 4.4.2) pour des fonctionnalités telles que interface utilisateur, traitement graphique, traitement de fichiers. Ce logiciel a été développé à SINTEF (Norvège) et est distribué par la société CAMO.

BLAST (Hittle, 1979), (Henon et al, 1981)

Avec BLAST, nous entrons dans la catégorie des programmes "monolithiques". BLAST réalise la simulation thermique d'un bâtiment et de quelques uns de ses équipements (Unité de traitement d'air, système de production d'énergie centralisé). BLAST est distribué, par l'US Army Construction Engineering Research Laboratory.

DOE-2.1 C (York et Tucker, 1981)

C'est l'autre logiciel de référence aux U.S.A. Développé et distribué par Lawrence Berkeley Laboratory, DOE-2.1 C réalise une simulation complète énergétique d'un bâtiment en considérant les aspects du bâtiment lui-même, des équipements et du coût d'exploitation. Ce logiciel apparaît relativement ouvert dans la mesure où l'utilisateur a le loisir de modifier les algorithmes contenus dans le programme.

SUNCODE (SERIRES) (De La Hunt, et Palmiter, 1985)

SUNCODE constitue la version "PC" du logiciel SERIRES, développé par le Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado. Il s'agit d'un programme monolithique de simulation d'un bâtiment avec un accent porté sur les phénomènes solaires passifs : calculs d'ombrages, de ligne de ciel, de radiations intérieures. SUNCODE ne tient compte des systèmes du bâtiment que de façon idéalisée. SUNCODE est distribué par Ecotope, Seattle, U.S.A.

MBDSA (Cotton et Nusgens, 1990)

C'est le logiciel belge de référence et dont ce travail a fait largement usage. Très proche de SUNCODE, MBDSA dérive de LPB-1, un programme de simulation pour gros ordinateur et possède également un lien avec TRNSYS dans la mesure où le coeur du programme constitue également un module TRNSYS. MBDSA réalise une simulation thermique d'un bâtiment en considérant les équipements comme idéalisés. MBDSA est distribué par l'ATIC, Bruxelles.

HTB 2 (Lewis et Alexander, 1990)

Dérivant de HTB ("Heat Transfer through Buildings"), HTB 2 constitue un logiciel relativement modulaire (quoique dans une mesure moindre que TRNSYS et HVACSim+) de simulation thermique d'un bâtiment et de ses équipements (représentés de façon assez sommaire). HTB 2 permet la modification et la substitution d'algorithmes au prix de changements mineurs dans le code source. HTB 2 est développé et distribué par l'Université de Galles à Cardiff.

ESP (Clarke, 1986)

S'affirmant comme un standard au niveau de la Communauté Economique Européenne, ESP constitue un système très complexe, très complet et modulaire de simulation thermique d'un bâtiment et de ses équipements. Ce logiciel possède les méthodes numériques les plus élaborées (volumes finis en 3 dimensions) pour réaliser ses calculs. Le logiciel a l'ambition de représenter mathématiquement tous les processus thermiques apparaissant dans un bâtiment. ESP est développé à l'Université de Strathclyde en Ecosse.

TSBI 3 (Christensen et Johnsen, 1991)

TSBI 3 constitue un logiciel de simulation thermique de bâtiment. Ecrit en langage C (ce qui est encore rare pour ce type de logiciel), TSBI 3 utilise une représentation objet du bâtiment composée de 5 couches hiérarchiquement imbriquées. TSBI 3 est développé et distribué par le Danish Building Research Institute au Danemark.

5.2.2.3. Synthèse

Le tableau 5.1 montre les caractéristiques comparées des 10 logiciels décrits succinctement ci-dessus, en tenant compte des critères énoncés en 5.2.2.1 : Modularité; Complexité de la simulation.

	Modulaire/ monolithique	Bâtiment/ Système
TRNSYS	M	B - S
HVAC Sim +	M	(B) - S
HVAC DYNAMICS	M	(B) - S
BLAST	m	B - S
DOE - 2.1	m	B - S
SUNCODE	m	B
MBDSA	m	B
HTB 2	(M)	B
ESP	M	B - S
TSBI 3	m	B

Tableau 5.1. Caractéristiques comparées des logiciels décrits

Il est évident que cette liste ne peut constituer un relevé exhaustif des logiciels disponibles. Elle renferme plutôt les logiciels les plus courants et le plus souvent mentionnés dans la littérature. Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans Achard et Gicquel (1986), Jorgensen (1983), Rittelman et Ahmed (1985), (IEA Task XI, 1993).

5.3. VALIDATION DU LOGICIEL MBDSA

5.3.1. Démarche de validation

Dans quelque domaine que ce soit, la validation absolue d'un programme ne peut jamais être réalisée. Certains auteurs (Bauman et al, 1983), (Leclercq, 1988) parlent même plus prudemment de la vérification de programmes plutôt que de la validation. Un programme de simulation du comportement thermique d'un bâtiment présente trop de paramètres (habituellement des centaines) que pour permettre un ajustement de l'ensemble de ces paramètres et la garantie que les résultats du programme soient absolument comparables (ie aptes à être comparés) avec les mesures enregistrées. Par conséquent, il faut en revenir à des techniques approximatives qui ne pourront qu'apporter une réponse partielle aux questions posées. L'utilisation de cellules-test, bâtiments simples aux dimensions réduites, apporte une certaine simplification et fait l'objet de nombreux travaux, notamment dans le cadre du projet des Communautés Européennes PASSYS (Wouters et al, 1993), (Van Dijck et Vanderlinden, 1993), (Dolley et al, 1993), (Strachan, 1993), (Martin et Watson, 1993), (Robinson et Littler, 1993). Judkoff (1988) propose quant à lui une méthodologie de validation divisée en 3 techniques.

1. Validation comparative : il s'agit de comparer deux logiciels ou deux modèles sur le même problème.
2. Validation analytique : le logiciel ou le modèle est comparé à une solution analytique. Ceci ne peut évidemment être réalisé que dans un nombre limité de cas.
3. Validation empirique : les résultats du logiciel sont comparés à des mesures expérimentales.

Ces trois techniques abordent le problème de la validation à des niveaux différents et se complètent mutuellement au sein d'une méthode globale d'évaluation d'un logiciel. La figure 5.3 montre l'interrelation entre les différents stades de la validation des programmes.

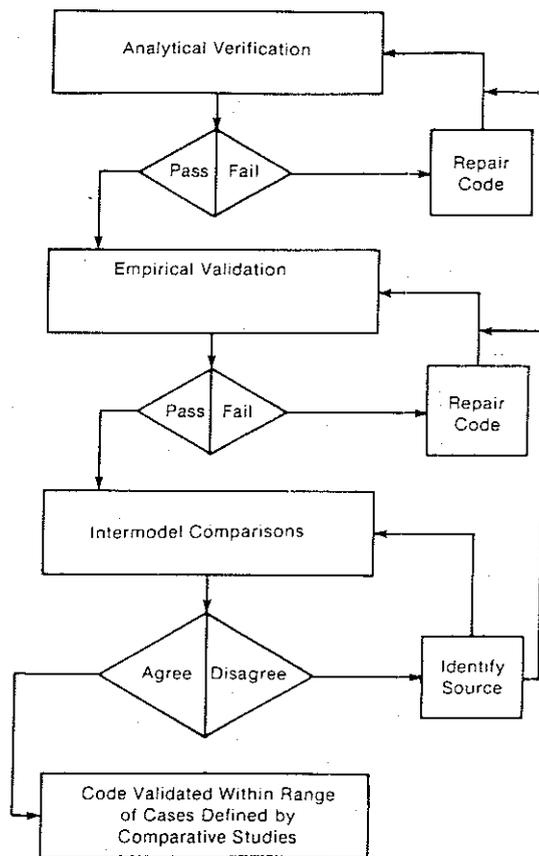


Fig. 5.3. Méthodologie de validation de logiciels de simulation du comportement thermique des bâtiments (extrait de Judkoff, 1988)

Les 3 techniques de validation proposées dans ce schéma présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que le montre le tableau 5.2.

Technique	Avantages	Désavantages
Comparative	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'imprécisions sur les inputs • Tout niveau de complexité • Bon marché • Rapide, beaucoup de comparaisons possibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de standard de référence
Analytique	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'imprécisions sur les inputs • Un standard de référence • Bon marché 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de test du modèle • Limité aux cas pour lesquels une solution analytique existe
Empirique	<ul style="list-style-type: none"> • Standard de référence approximatif • Tout niveau de complexité 	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitudes liées aux mesures • Des mesures précises de haute qualité sont coûteuses et consommatrices de temps • Un nombre limité de données sont disponibles

Tableau 5.2. Avantages et inconvénients des techniques de validation de logiciels de simulation thermique de bâtiments (d'après Judkoff (1988))

Toute démarche de validation doit se baser sur un choix de logiciel. Dans le cadre de cette étude, cette sélection devait s'opérer parmi les candidats présentés en 5.2.2.2, qui représentent les produits les plus courants et les plus utilisés dans ce domaine.

5.3.2. Choix du logiciel

Un des objectifs du projet IEA Task XI (voir 1.2.1.1) consistait à réaliser des études de sensibilité sur les paramètres-clés de la conception des bâtiments afin de produire des directives de conception à l'usage des ingénieurs et architectes. Pour ce faire, il était impératif de disposer d'un logiciel de simulation afin de réaliser des évaluations successives des différentes variantes d'un même projet. Le travail assigné à la FUL impliquait une telle démarche sur le bâtiment académique de la FUL et requérait le choix d'un logiciel adapté à la

tâche. A l'époque du choix (1987-1988), l'Université de Liège (Laboratoire de Thermodynamique) commençait à diffuser, via le BAG ("Building Analysis Group"), groupement qui rassemble chercheurs et partenaires privés belges impliqués dans l'analyse énergétique des bâtiments, un logiciel de simulation thermique pour bâtiments multizone : MBDS ("Mutizone Building Dynamic Simulation"). Destiné aux ordinateurs de type PC, ce logiciel utilisait certaines ressources, notamment le pré-processeur météorologique de son prédécesseur, le programme LPB-1, également diffusé par l'Université de Liège. Son originalité résidait dans le développement du coeur du programme (le simulateur thermique proprement dit) comme un module compatible avec le logiciel TRNSYS (voir 5.2.2.2) et entouré d'une couche reproduisant l'environnement TRNSYS. A l'époque, ce composant a reçu l'appellation TYPE 46 (Braun, 1984). Par la suite, le module évolua dans deux directions différentes : une version issue du type 46 demeura incluse au sein de MBDS, une autre fut officiellement incluse dans le logiciel TRNSYS à partir de la version 12.2 (University of Wisconsin, 1988). Les 2 versions subirent ensuite des modifications différentes et donnèrent lieu à deux modules de simulation présentant des nuances relativement importantes (Liebecq, 1989). En 1990, le logiciel MBDS fut commercialisé par l'ATIC ("Association Technique de l'Industrie du chauffage, de la ventilation et des branches Connexes") sous le nom de "MBDSA" le "A" désignant l'ATIC. Dans le contexte du projet IEA Task XI, il nous apparut intéressant de soumettre le logiciel MBDSA à un "baptême du feu" en comparant ses prédictions aux valeurs mesurées sur le terrain pendant les différentes campagnes de mesure (voir chapitre 2) afin de déterminer son aptitude à réaliser l'étude de sensibilité paramétrique demandée. A l'époque du choix, le logiciel SUNCODE (De La Hunt et Palmiter, 1985) s'imposait comme un standard validé pour la simulation des bâtiments solaires passifs. Pour cette raison, la validation de MBDS fut entreprise, non seulement par rapport aux résultats de l'expérience (validation empirique), mais également par rapport aux prédictions du logiciel SUNCODE (validation comparative).

5.3.3. Mise en oeuvre de la validation de MBDSA

5.3.3.1. Présentation des périodes de validation

Afin de tester l'adéquation de MBDSA à la simulation thermique de bâtiments solaires passifs dans des conditions aussi représentatives que possible, il fut décidé de mettre en oeuvre la validation pour deux périodes différentes et significatives pour lesquelles nous disposions de mesures complètes et de bonne qualité. La première période se situe en hiver et s'étend du 04.02.89 au 10.02.89; la seconde, estivale, commence le 01.08.89 et se termine le 18.08.89. La figure 5.4 met en évidence le caractère froid et très couvert de la période hivernale. Par contre, la période estivale apparaît comme très ensoleillée et chaude, comme en atteste la figure 5.5.

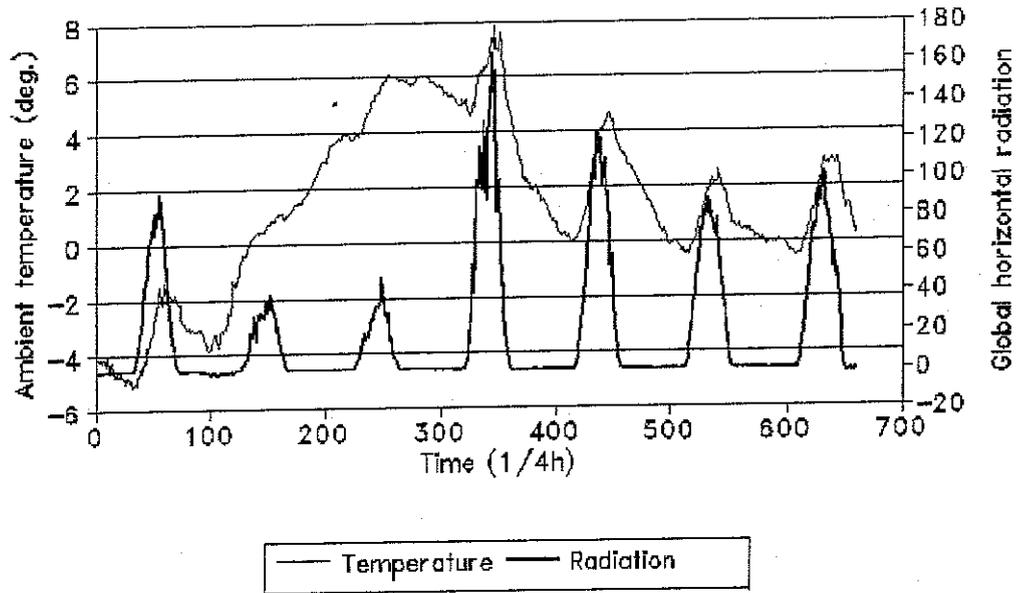


Fig. 5.4. Conditions météorologiques (température extérieure et rayonnement solaire global horizontal) de la période hivernale de validation du logiciel MBDSA

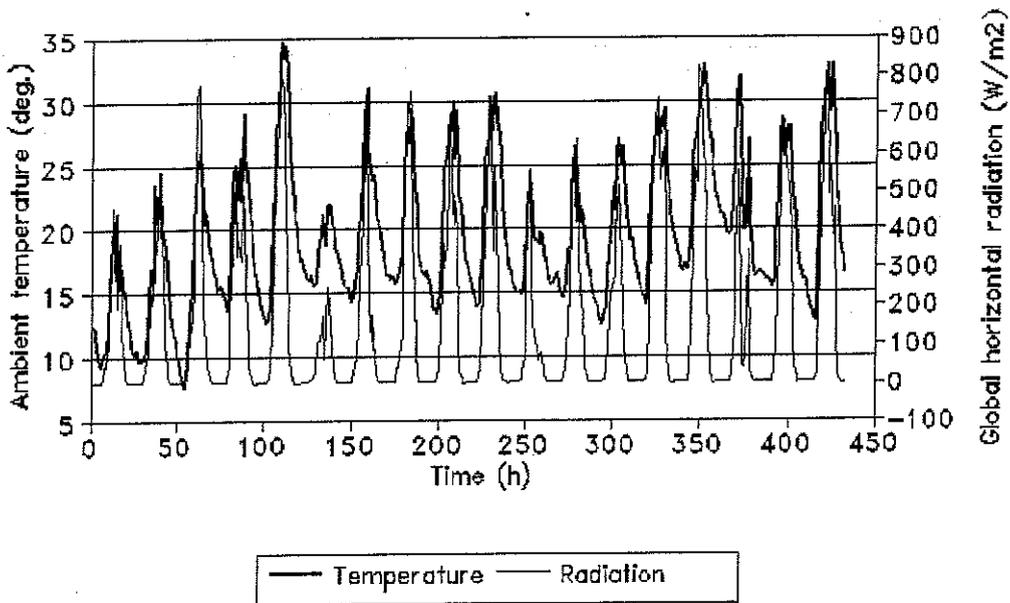


Fig. 5.5. Conditions météorologiques (température extérieure et rayonnement solaire global horizontal) de la période estivale de validation du logiciel MBDSA

5.3.3.2. Description du bâtiment

Ensuite, le fichier de données compatible avec le logiciel a été constitué. Il s'agit d'une description du bâtiment et de son mode de fonctionnement, très détaillée et fastidieuse dont le développement est relaté dans André (1989a). Ce travail a successivement abordé les points suivants :

- la définition des zones en fonction des caractéristiques thermiques des différents locaux du bâtiment
- la définition des propriétés physiques des matériaux utilisés. Cette étape a été grandement facilitée par le développement d'une base de données informatisée concernant les matériaux de construction (voir chapitre 6)
- la définition des variables d'entrée externes
- la définition des horaires et des macro-horaires
- la définition des types de murs
- la définition des types de fenêtres
- la définition des gains internes dus aux occupants, aux lumières, aux équipements
- la définition des caractéristiques d'infiltration
- la définition des systèmes de ventilation mécanique
- la définition des dispositifs de chauffage
- la définition des dispositifs de refroidissement
- la définition des orientations du bâtiment
- la description du bâtiment à partir des éléments constitutifs énumérés ci-avant
- la définition des variables de sortie du programme.

La même opération a été réalisée pour le logiciel SUNCODE qui possède d'ailleurs des exigences extrêmement semblables à celles de MBDSA. En effet, cette opération a successivement considéré les aspects suivants :

- la définition des zones thermiques
- la définition des fenêtres
- la définition des murs
- la définition des murs-Trombe
- la définition des surfaces extérieures
- la définition des types d'équipement
- la définition des types de murs "Trombe"
- la définition des types de murs
- la définition des types de matériaux
- la définition des types de vitrage
- la définition des types de protection solaire
- la définition des inputs de la simulation
- la définition des horaires
- la définition des saisons ("macro-horaires")
- la définition de certains paramètres de la simulation (conditions initiales, paramètres de convergence numérique, ...)
- la définition des stations météorologiques.

Nous n'entrerons pas dans le détail de la constitution de ces fichiers. Le lecteur intéressé trouvera dans André (1989a) toutes les informations nécessaires.

5.3.3.3. Résultats pour la période hivernale

La période hivernale (04.02.89 au 10.02.89) a été simulée au moyen des 2 logiciels et les résultats (températures et consommations globales d'énergie) ont été comparés aux valeurs mesurées sur le bâtiment.

Tout d'abord, une comparaison des consommations d'énergie mesurée et calculée par les deux programmes produits les résultats suivants (tableau 5.3).

Mesure	MBDSA	Suncode
16.4	11.5	11.3

Tableau 5.3. Consommations d'énergie mesurée et calculée par MBDSA et Suncode. Période hivernale (GJ)

On remarque que les deux programmes calculent des consommations d'énergie extrêmement semblables et sensiblement comparables à la valeur mesurée si on tient compte du fait que les logiciels calculent une "demande de chaleur" à fournir par un système de chauffage donné. Le rapport entre les quantités calculée et mesurée conduit à une efficacité du système de 0,7, ce qui constitue un ordre de grandeur raisonnable pour le type de système implanté dans le bâtiment FUL.

En ce qui concerne les températures, les premiers résultats obtenus montraient une importante déviation des valeurs calculées par rapport aux valeurs mesurées. A titre d'exemple, la figure 5.6 représente les températures dans la zone "Grand auditoire". On constate notamment un grand écart pendant les deux premiers jours de la simulation qui correspondent à un week-end. Une investigation plus profonde à partir de ces résultats a suggéré que le bâtiment était chauffé pendant cette période, contrairement au mode de fonctionnement normal. L'expérience (relevé des compteurs de gaz et monitoring du système de chauffage) a confirmé ces hypothèses.

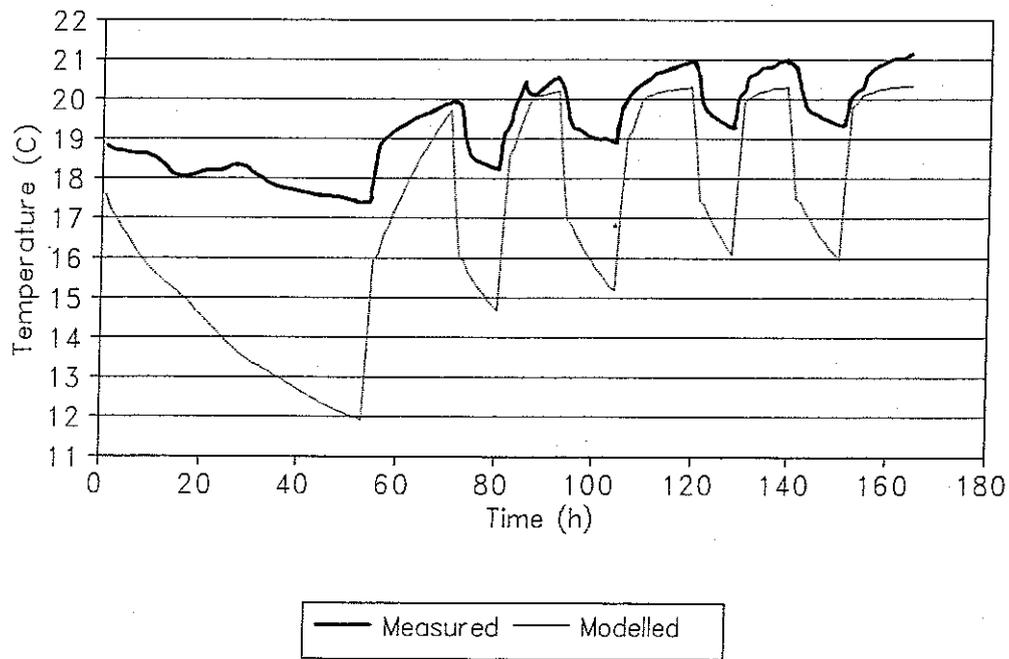


Fig. 5.6. Températures mesurées et calculées dans la zone "Grand auditorio".
Modélisation approximative. Période hivernale

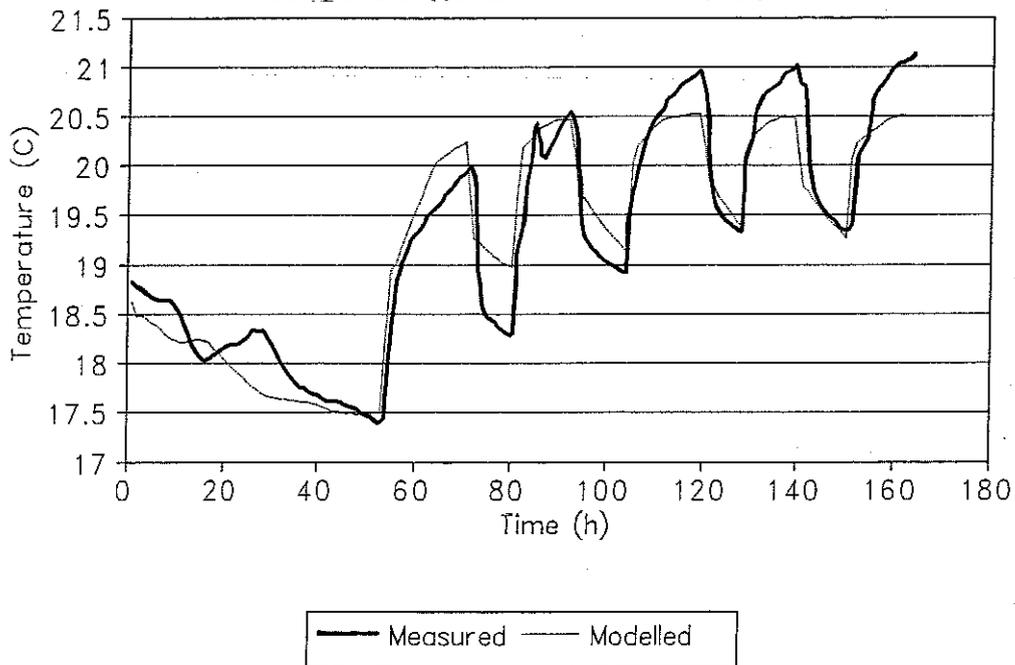


Fig. 5.7. Températures mesurées et calculées dans la zone "Grand auditorio".
Modélisation réaliste. Période hivernale

Par conséquent, les données de la simulation ont été ajustées de façon à prendre en compte les imperfections du contrôle du système de chauffage. Ces fichiers modifiés ont conduit à des résultats nettement améliorés comme en atteste la figure 5.7 qui compare, de nouveau, les températures mesurées et calculées dans la zone "Grand Auditoire".

La comparaison des températures dans les autres zones du bâtiment conduit à des conclusions similaires : à condition de disposer d'une connaissance suffisante de la quantité d'énergie injectée dans le bâtiment, MBDSA calcule une estimation raisonnablement bonne des températures.

Cette comparaison confirme la bonne qualité des prédictions du logiciel.

5.3.3.4. Résultats pour la période estivale

De la même façon, la période estivale a été simulée (01.08.89 au 18.08.89). Il s'agit d'une période très chaude et très ensoleillée caractérisée par une coupure du système de chauffage, ce qui supprime les inconvénients liés à la connaissance approximative de l'énergie réellement injectée dans les zones du bâtiment. De manière générale, la qualité des prévisions de MBDSA apparaît bonne, spécialement dans les zones fortement ensoleillées. La figure 5.8 montre la comparaison des températures observées dans la zone "Serre ouest" (excellent accord entre mesure et modèle) tandis que la figure 5.9 représente les températures mesurées et calculées dans la zone "Bureaux du 1^{er} étage" (bon accord).

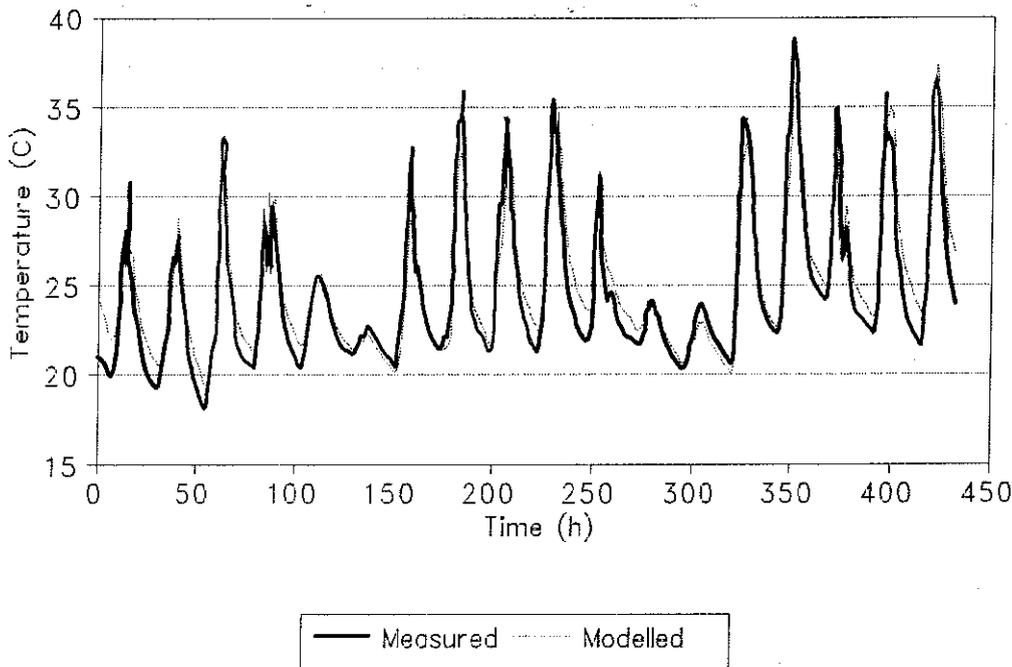


Fig. 5.8. Températures mesurées et calculées dans la zone "Serre ouest". Période estivale

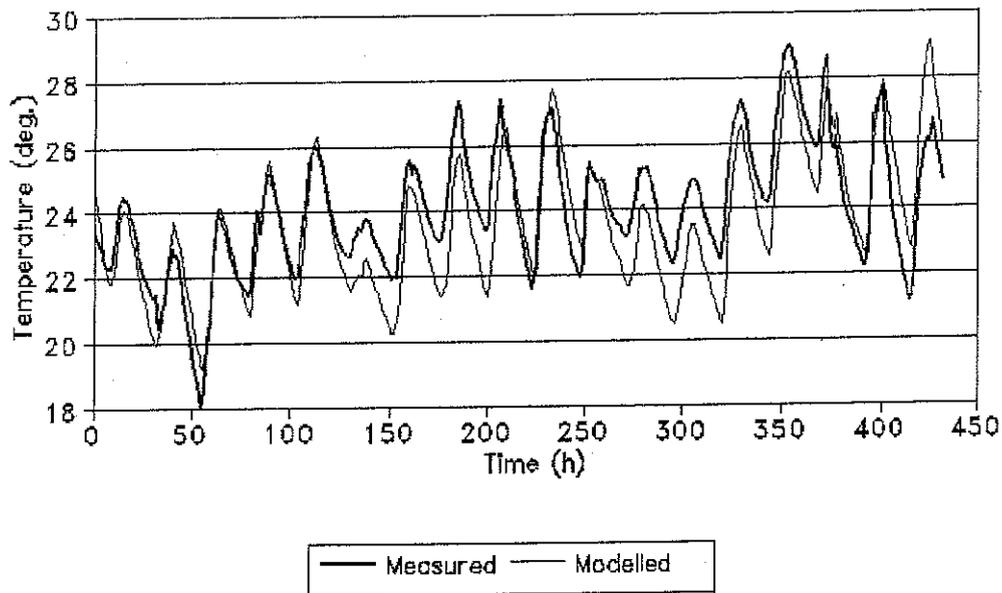


Fig. 5.9. Températures mesurées et calculées dans la zone "Bureaux".
Période estivale

Enfin, la qualité de la simulation des températures de surface du mur de masse est attestée par la figure 5.10.

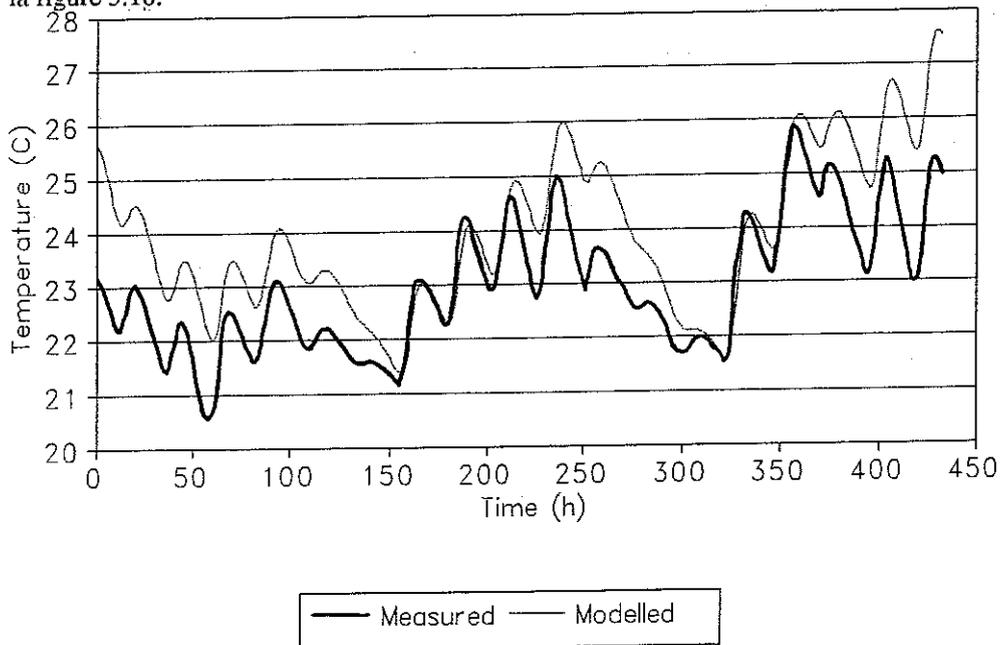


Fig. 5.10. Températures mesurées et calculées à la surface du mur de masse.
Période estivale

5.3.3.5. Conclusions

Les deux périodes servant de support à la validation du logiciel ont mis en évidence la bonne aptitude de MBDSA à la simulation de bâtiment du type de celui envisagé. Par conséquent, ce logiciel peut être retenu pour la suite des opérations, à savoir sa calibration et son usage pour la réalisation d'études de sensibilité paramétrique.

5.4. CALIBRATION DU LOGICIEL MBDSA

5.4.1. Démarche de calibration

Pour effectuer une utilisation quelconque d'un logiciel de simulation numérique, l'étape de la validation du programme ne suffit pas. En effet, si un logiciel donné semble posséder toutes les aptitudes nécessaires à la réalisation d'un problème, son application à une situation bien précise réclame une configuration particulière. Par sélection d'une configuration, nous entendons par exemple le choix d'une option parmi un ensemble de sélections possibles ou encore l'ajustement de la valeur de certains paramètres du programme.

Dans la majorité des cas, le choix d'une option se fera en examinant les hypothèses sous-tendant les différentes valeurs de l'option et en jugeant de leur conformité avec la situation traitée. Il peut arriver que cette observation ne débouche sur aucune préférence de choix, auquel cas il s'agira d'utiliser d'autres arguments : intuition, expérience, préférence personnelle. Si on veut faire preuve d'un peu plus d'objectivité, on pourra tester différentes options, comparer leurs résultats et retenir celle qui semble conduire à une meilleure performance du logiciel.

En ce qui concerne l'ajustement de la valeur de certains paramètres du programme, trois méthodes apparaissent également possibles :

- choix d'une valeur en fonction de la conformité à certaines hypothèses
- choix au terme d'une procédure "essais et erreurs"
- ajustement par utilisation d'une méthode d'estimation de paramètres ou d'identification de systèmes par rapport à des valeurs expérimentales.

Cette dernière méthode présuppose le développement d'un modèle d'un sous-système du problème étudié, étant donné le fait que le logiciel lui-même ne peut être utilisé en temps que support à l'estimation des paramètres.

5.4.2. Mise en oeuvre de la calibration de MBDSA

A titre d'exemple, le logiciel MBDSA a été calibré avant de servir à une réalisation d'études de sensibilité paramétrique. Pour ce faire, nous avons retenu la troisième méthode d'ajustement des paramètres présentés ci-dessus. Dans cette optique, il a été fait usage des méthodes et résultats présentés au chapitre 4 (voir 4.4.4.1 et 4.4.4.2). Les valeurs du coefficient de diffusivité thermique du mur de masse et de certains coefficients d'échange convectifs ont été estimés à partir de modèles de sous-systèmes du système global. Concrètement, l'opération consiste à isoler un sous-système en considérant le reste du système comme conditions aux limites, à réaliser une estimation du paramètre de ce sous-système et à réinjecter les valeurs de ces paramètres dans le modèle global. Pour assurer la validité de cette opération, il importe que :

- les variables du système global et celles du sous-système local correspondent
- les paramètres du système global et du sous-système local correspondent ou, à tout le moins, que la relation entre les deux soit connue.

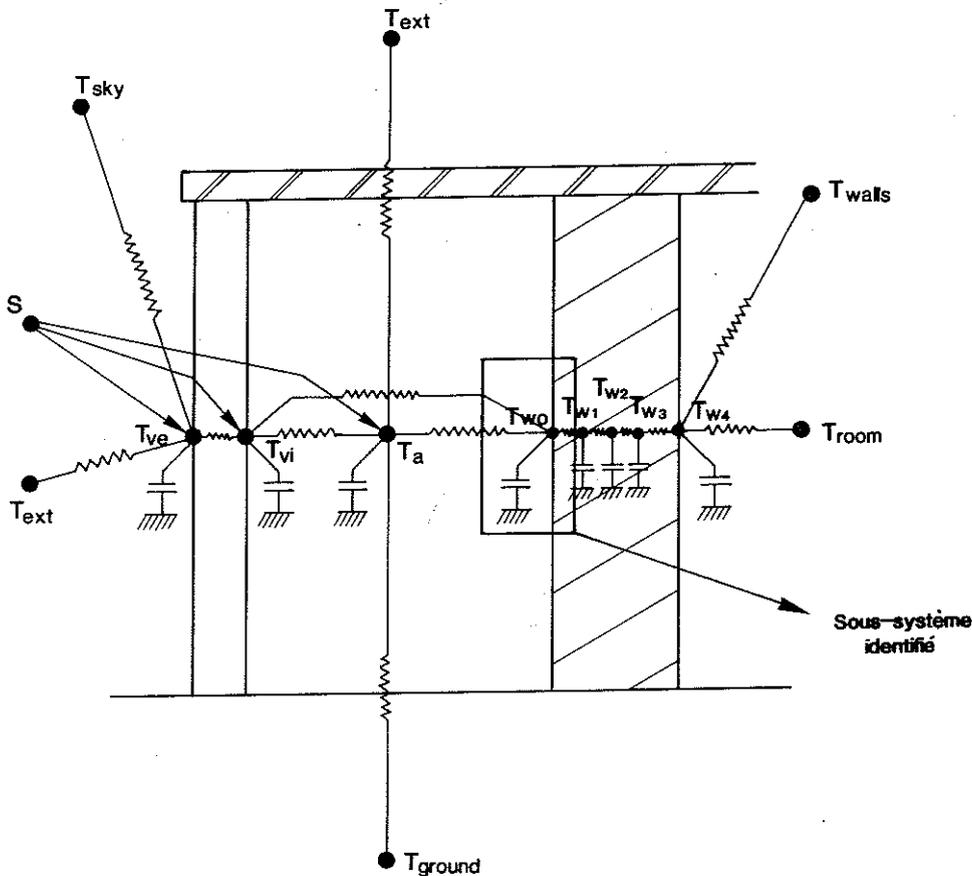


Fig. 5.11. Calibration d'un modèle de système global par estimation des paramètres de modèles de sous-systèmes locaux

L'ensemble de la procédure est représenté par la figure 5.11, pour l'exemple d'un coefficient d'échange du mur de masse.

Dans ce cas, le sous-système local "surface du mur de masse" (noeud T_{w0}) a été isolé du système global "bâtiment". Les différents paramètres de ce sous-système ont été identifiés à partir du modèle (4.53) (voir 4.4.4.2) puis réinjectés dans le système "bâtiment", modélisé dans MBDSA. Dans le cas du logiciel MBDSA, l'efficacité de la procédure est démontrée par la figure 5.12 qui compare la température de la zone "Grand auditoire" obtenue en utilisant la valeur "standard" du coefficient de diffusivité thermique ($0.84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) et une valeur ajustée ($1.15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) découlant de la réalité bi-dimensionnelle du flux de chaleur dans le mur.

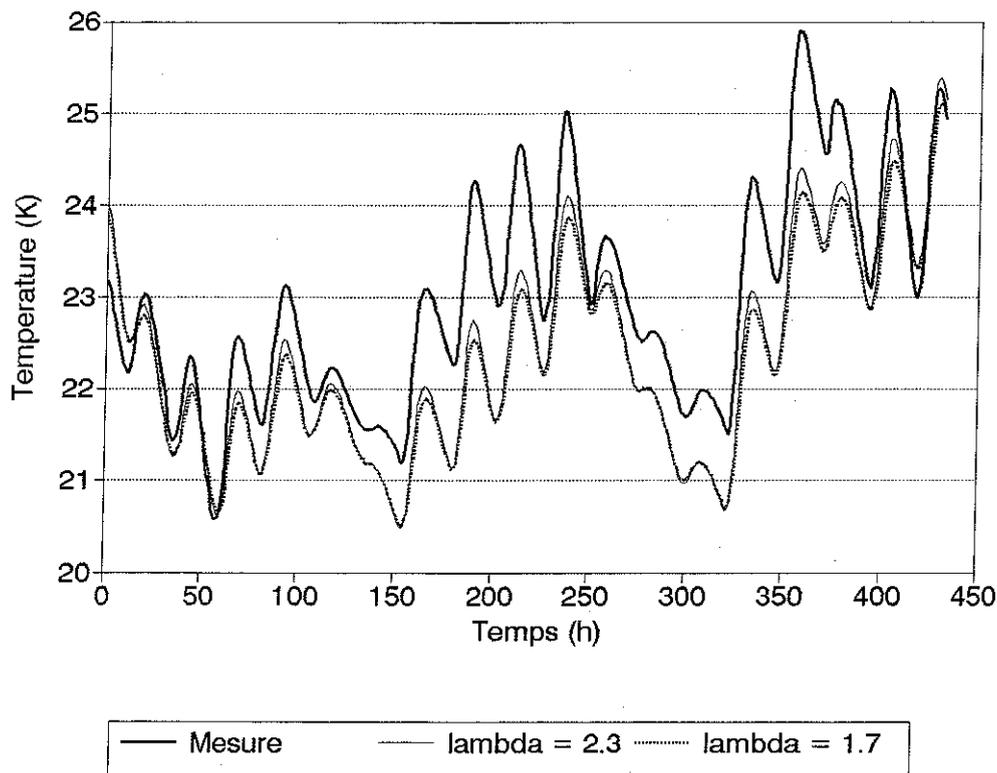


Fig. 5.12. Amélioration de la performance de MBDSA par calibration de la diffusivité thermique

L'amélioration de la qualité de la simulation après calibration est mise en évidence par le calcul de l'écart-type des écarts entre valeurs observée et simulée:

Avant calibration: écart-type = 0.861 K
 Après calibration: écart-type = 0.770 K

5.5. UTILISATION DU LOGICIEL MBDSA

5.5.1. Introduction

Lorsqu'un logiciel a franchi avec succès les étapes de la validation et de la calibration, il devient seulement possible d'en faire une quelconque utilisation. Cette affirmation apparaît aussi importante que généralement oubliée dans l'usage le plus courant des logiciels de simulation. En effet, l'avènement de l'outil informatique a trop souvent engendré une confiance totale, voire aveugle, dans les résultats issus de l'ordinateur, au point d'en oublier l'existence d'hypothèses de travail éminemment restrictives, de choix d'options essentielles et aux conséquences parfois désastreuses, d'approximations de la modélisation qui induisent une imprécision inévitable dans les résultats. Toutes ces raisons font qu'une analyse préalable de l'outil s'impose avant d'en faire un quelconque usage. Dans le cas du logiciel MBDSA, les opérations décrites aux paragraphes précédents permettent au programme de se présenter au départ des applications qui lui sont soumises, nanti des garanties et de la configuration nécessaires à une utilisation fiable. Ces applications, réelles ou potentielles, ressortent en réalité à 4 catégories : prédiction, analyse paramétrique, simulation de situations non mesurables, émulation. Ces applications sont présentées en détail aux paragraphes suivants. Les deux premières ont été réalisées dans le cadre du projet IEA Task XI; pour les deux dernières, il sera seulement fait état de potentialités résultant de recherches récentes en la matière.

5.5.2. Prédiction du comportement du bâtiment académique de la FUL

La disponibilité d'un logiciel de simulation numérique du comportement thermique des bâtiments tel que MBDSA permet d'envisager de réaliser une prédiction du comportement de ce bâtiment. Pour ce faire, le logiciel est alimenté avec des données décrivant successivement le bâtiment et ses conditions opératoires, les conditions météorologiques appropriées au site, les paramètres de la simulation proprement dite. Ces 3 fichiers de données alimentent les 3 modules du logiciel MBDSA : PREPA, le préprocesseur du bâtiment; PRETA le préprocesseur météorologique; MBDSA, le simulateur du bâtiment proprement-dit. Les résultats de la simulation peuvent alors être traités par le postprocesseur POSTA. L'ensemble de la procédure est illustré par la figure 5.13.

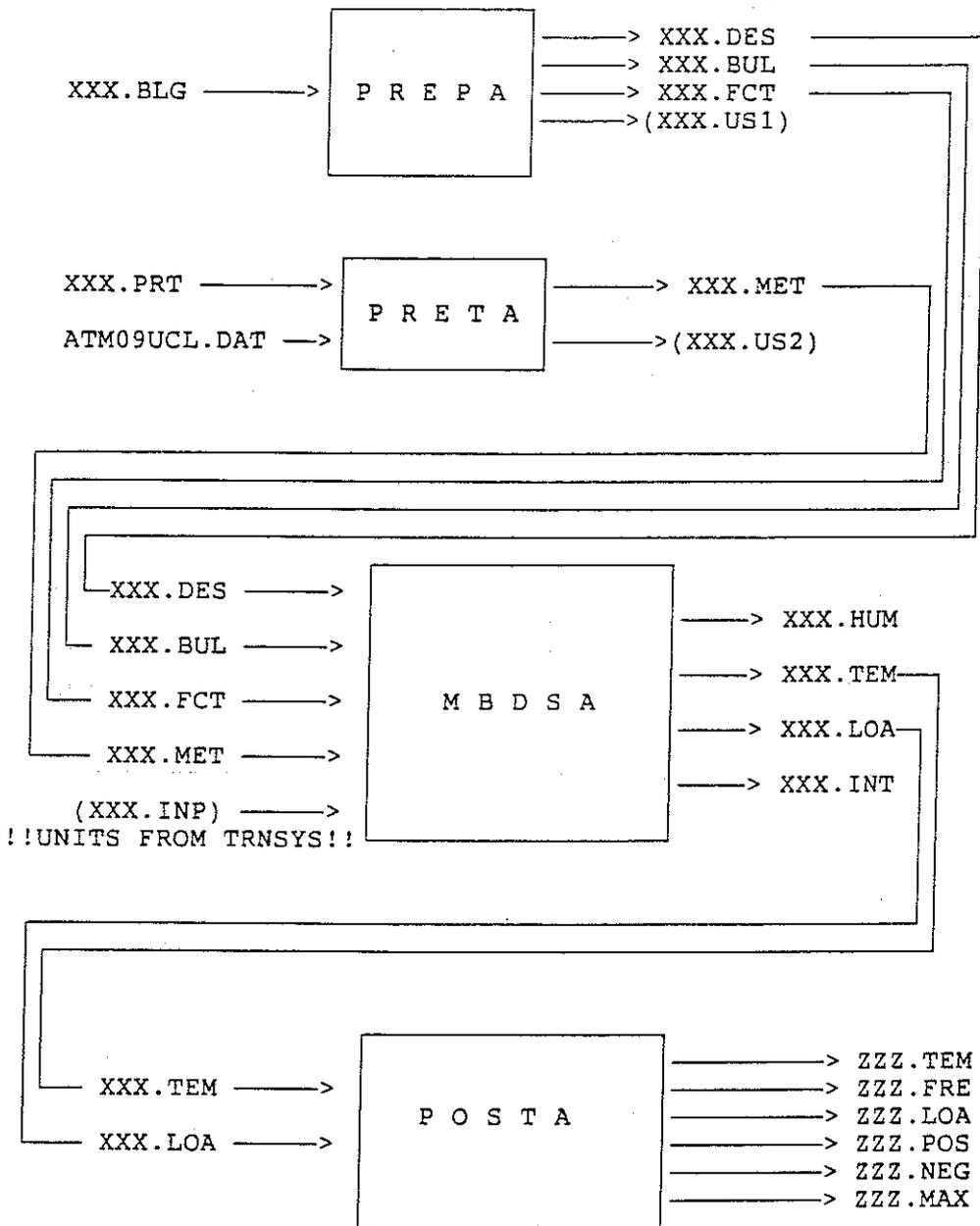


Fig. 4 Simulation procedure

Fig. 5.13. Procédure de simulation au moyen de MBSDA

La non-disponibilité des mesures météorologiques complètes pour le site d'Arlon a entraîné le choix d'un site alternatif pour lequel des données suffisantes existent, en l'occurrence la station IRM de Uccle. Deux autres stations apparaissent disponibles pour la Belgique : Saint-Hubert (climat ardennais) et Ostende (climat côtier). Le choix de Uccle apparaît suffisant dès lors que seules les mesures de température et d'ensoleillement sont requises. Pour des données plus locales, telles le vent et la pluviométrie, une station plus proche se serait avérée nécessaire.

Dans ces conditions, la simulation d'une année-type de fonctionnement du bâtiment académique de la FUL a conduit aux résultats exprimés par le tableau 5.4.

Mois	Charge [GJ]	Gains solaires [GJ]	Surchauffe bureaux [H]
Janvier	35.6	4.1	0
Février	28.5	7.7	0
Mars	23.1	12.7	0
Avril	15.4	15.1	0
Mai	4.2	21.3	36
Juin	0.6	18.1	157
Juillet	0.0	19.9	73
Août	0.0	17.9	8
Septembre	2.9	18.3	120
Octobre	13.5	11.5	0
Novembre	27.4	6.2	0
Décembre	37.6	3.8	0
TOTAL	188.7	156.5	394

Tableau 5.4. Résultats de la simulation du bâtiment académique de la FUL par le logiciel MBDSA

Dans ce tableau, la première colonne représente la charge ou demande de chaleur nette du bâtiment; la seconde comptabilise les gains solaires pénétrant à travers les vitrages. Enfin, la troisième colonne renseigne le nombre d'heures pendant lequel la température de la zone "bureau" dépasse 24 °C. Ce tableau montre que les gains solaires couvrent théoriquement 82.9 % de la charge du bâtiment, au prix d'une surchauffe estivale relativement importante. Ces résultats vont servir de base de comparaison pour l'étude de sensibilité paramétrique relatée ci-après. Comparés à ceux du tableau 2.2, ces résultats soulignent la différence entre consommations mesurée et calculée, le rendement du système de chauffage ne pouvant à lui seul expliquer le passage d'une charge théorique de 188.7 GJ à une consommation réelle de 360 GJ, même si les conditions météorologiques apparaissent différentes. Une explication plausible réside dans la modélisation imprécise du système de chauffage (voir 5.3.3.3) et peut-être également dans une sous-estimation des taux de renouvellement d'air.

5.5.3. Analyse paramétrique ou étude de sensibilité du bâtiment académique de la FUL (André, 1989 c)

5.5.3.1. Démarche d'analyse paramétrique

L'analyse paramétrique constitue l'outil privilégié d'optimisation à partir de simulations (Wang et Balcomb, 1979), (Anderson et al, 1984), (Baleynaud et al, 1991). La configuration retenue et construite du bâtiment de la FUL conduit aux performances indiquées ci-dessus. L'objet de l'analyse paramétrique est de déterminer la configuration fictive du bâtiment qui aurait optimisé ces performances. La simulation numérique constitue un outil indispensable à la réalisation de cet objectif puisqu'elle permet de prédire le comportement d'un nombre indéfini de variantes du bâtiment réel et de comparer les performances de ces variantes à celles du design construit, que nous appellerons désormais "design de base". Par ailleurs, le même outil permet de comparer l'efficacité de toutes les variantes testées, présentant toutes, de par la définition du bâtiment, des stratégies solaires passives, à une variante "classique", construite d'après les standards belges (isolation thermique, surface vitrée). Nous appellerons cette variante "design de référence". Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet IEA Task XI, afin d'aboutir aux directives de conception présentées dans l'ouvrage "Passive Solar Commercial and Institutional Buildings" (IEA Task XI, 1993).

5.5.3.2. Mise en oeuvre

Pour ce faire, il convient d'abord de définir quelles sont les variables (les paramètres du bâtiment) sur lesquelles nous allons agir afin de définir les variantes. Ici, une bonne part d'intuition s'avère nécessaire dans la mesure où la sensibilité des performances du bâtiment par rapport à l'un de ses paramètres n'est pas connu avant de réaliser l'analyse. Nous avons dès lors délibérément choisi un certain nombre de ces paramètres, au risque d'en oublier certains ou d'attacher une trop grande importance à d'autres. Il faut signaler également que le choix de ces paramètres s'est opéré dans l'optique d'une optimisation du concept solaire passif essentiel du bâtiment, à savoir le mur de masse. La liste suivante indique les paramètres retenus, leur valeur de base (ie la valeur caractérisant le design construit) et les variantes considérées dans cette analyse.

1. Orientation du bâtiment

Base :	sud
Variantes :	ouest
	est

2. Type de vitrage

Base : double vitrage, haute émissivité
Variantes : simple vitrage
double vitrage, basse émissivité
triple vitrage, haute émissivité
triple vitrage, basse émissivité
supervitrage

3. Occultation du vitrage

Base : occultation nocturne + week end
Variantes : occultation nocturne seulement
pas d'occultation nocturne

4. Proportion de surface vitrée en façade sud

Base : 66 %
Variantes : 0 %
25 %
50 %
75 %
100 %

5. Géométrie de l'espace-tampon

Base : large
Variantes : étroit (valeur classique)

6. Propriétés d'absorption du mur de masse (couleur des murs)

Base : murs blancs, ombragés
Variantes : murs noirs
murs bruns
murs gris
murs blancs

7. Matériau constitutif du mur de masse

Base : béton armé
Variantes : maçonnerie
eau

8. Epaisseur du mur accumulateur

Base : 25 cm
Variantes : 5 cm
10 cm
15 cm
20 cm

9. Isolation du mur de masse

Base : isolation
Variante : pas d'isolation

10. Ventilation de l'espace-tampon

Base : mur de masse sans ventilation
Variantes : mur trombe avec 200 m³/h
mur trombe avec 400 m³/h

11. Climat

Base : Bruxelles
Variantes : Oslo
Copenhague
Zürich
Würzburg
Rome

Par ailleurs, la réalisation d'une étude de sensibilité impose le choix de critères d'évaluation par rapport auxquels les différentes variantes pourront être comparées. Dans le cas de l'analyse énergétique d'un bâtiment, les critères suivants, caractérisant les notions d'énergie et de confort, s'imposent tout naturellement :

- la charge énergétique annuelle
- le nombre annuel d'heures de surchauffe (définie arbitrairement par le dépassement d'une température de 24 °C) dans le local "bureaux", qui est celui le plus constamment occupé.

Pour suivre une tendance en matière d'environnement, il aurait été pertinent de tenter de définir un indice de performance "intégrateur" prenant en compte les notions d'énergie et de confort. Les spécifications du projet IEA Task XI ne prévoyaient pas cet aspect du problème et les deux critères demeureront dès lors considérés isolément. Néanmoins, une technique d'intégration de critères sera proposée au chapitre 9, par le biais de l'analyse multicritère.

5.5.3.3. Résultats

La combinaison des variantes citées ci-dessus a engendré l'exécution de près de septante simulations numériques couvrant une période de un an, chacune différant de la simulation de base par un seul paramètre. Le détail des résultats est donné dans (André, 1989 c) et dans (IEA Task XI, 1993). Ces résultats conduisent au tracé de courbes de sensibilité du bâtiment académique de la FUL par rapport aux principaux paramètres qui le caractérisent.

Ces courbes de sensibilité sont reprises dans les pages qui suivent. On y remarque la grande dépendance du comportement thermique du bâtiment par rapport à certains paramètres, entre autres la qualité et la surface de la partie vitrée de la façade sud. A l'opposé, le design semble pratiquement insensible par rapport à d'autres paramètres tels que l'épaisseur des murs de masse, du moins en ce qui concerne la consommation énergétique.

1. Orientation du bâtiment

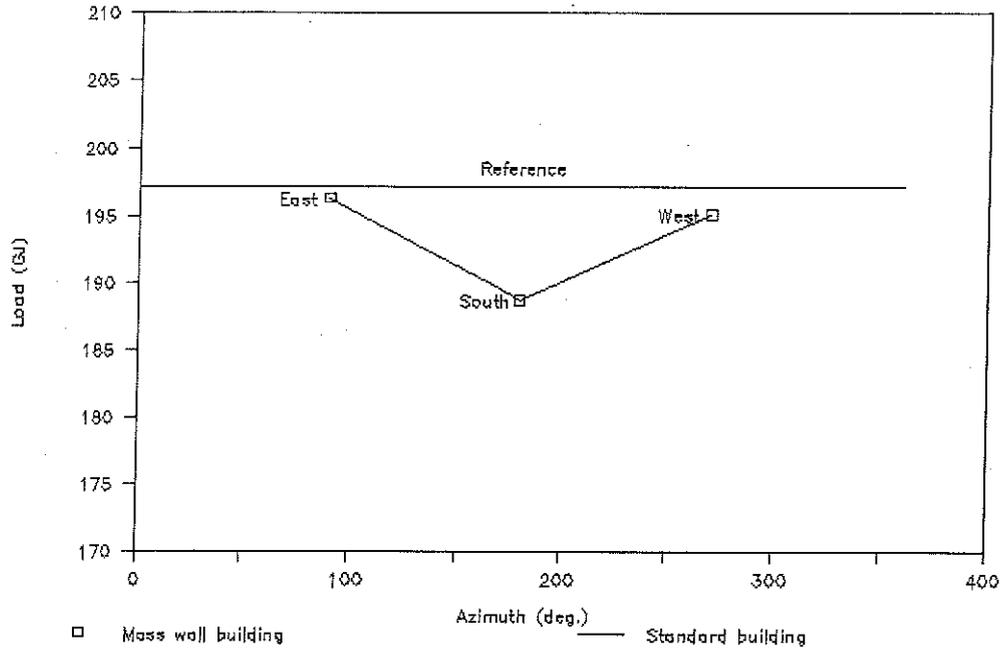


Fig. 5.14. Charge énergétique annuelle - orientation

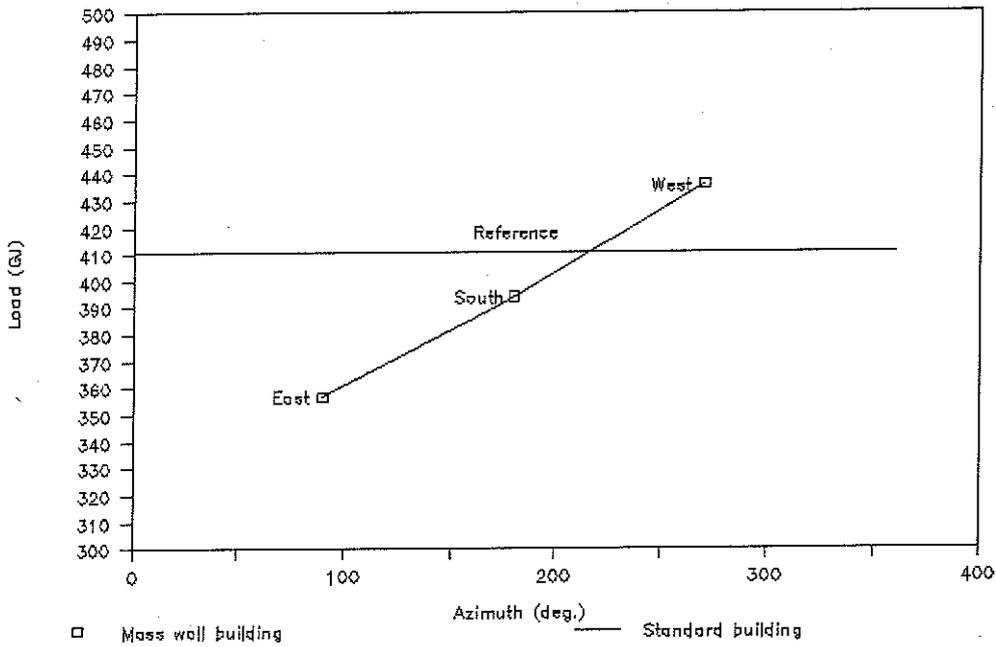


Fig. 5.15. Surchauffe annuelle - orientation

2. Type de vitrage

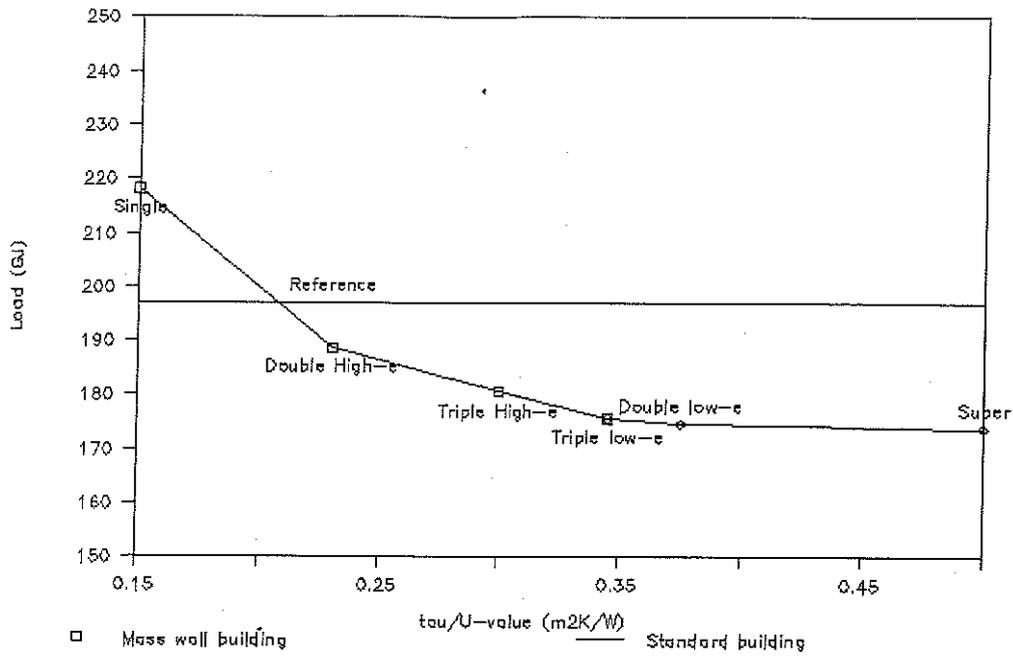


Fig. 5.16. Charge énergétique annuelle - Type de vitrage

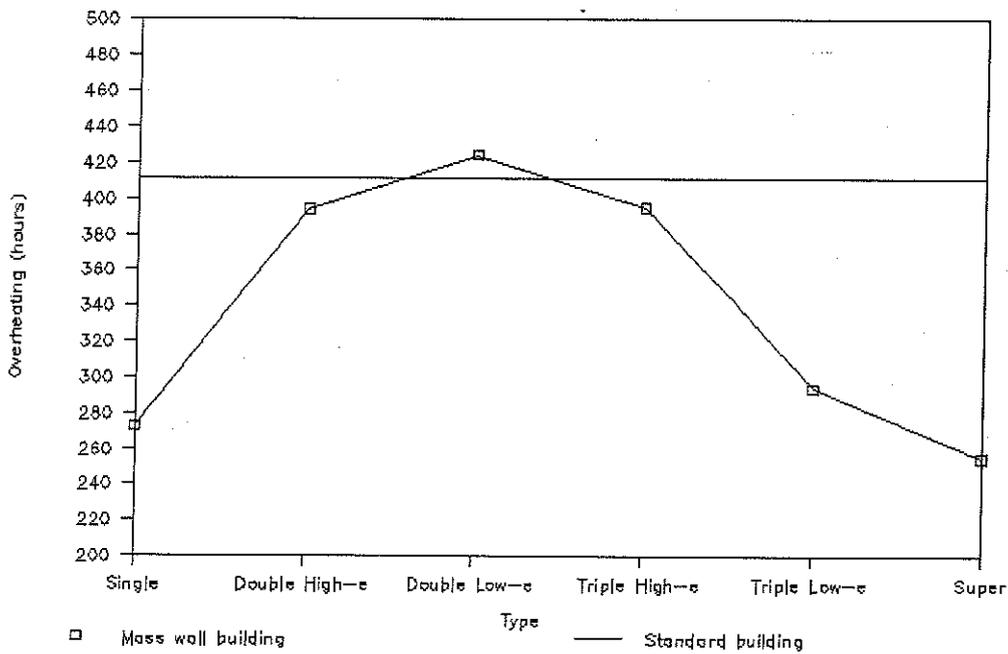


Fig. 5.17. Surchauffe annuelle - Type de vitrage

3. Occultation du vitrage

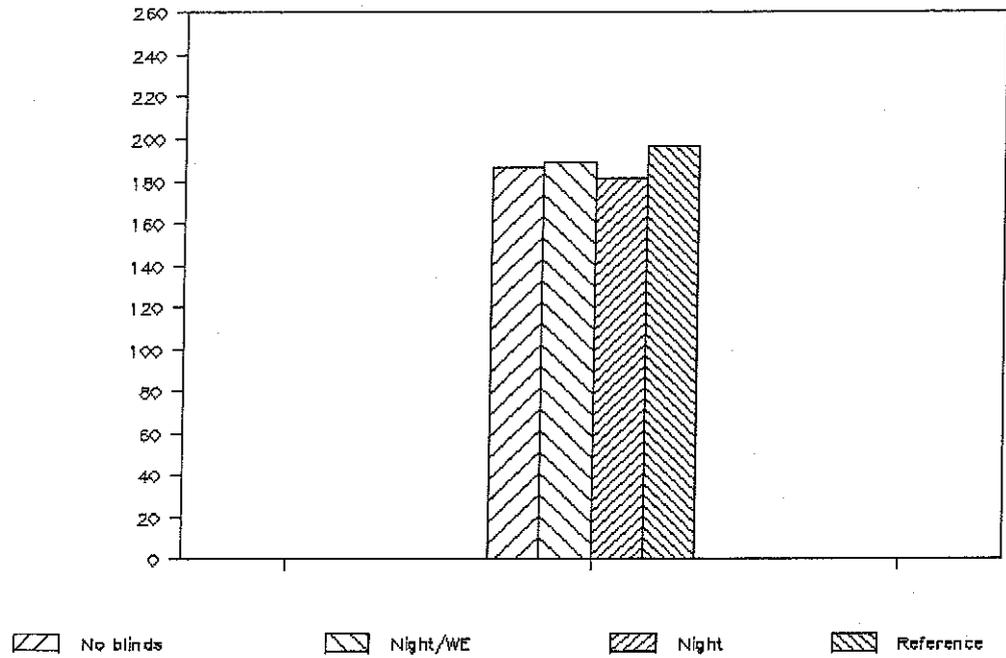


Fig. 5.18. Charge énergétique annuelle - Stratégie d'occultation du vitrage

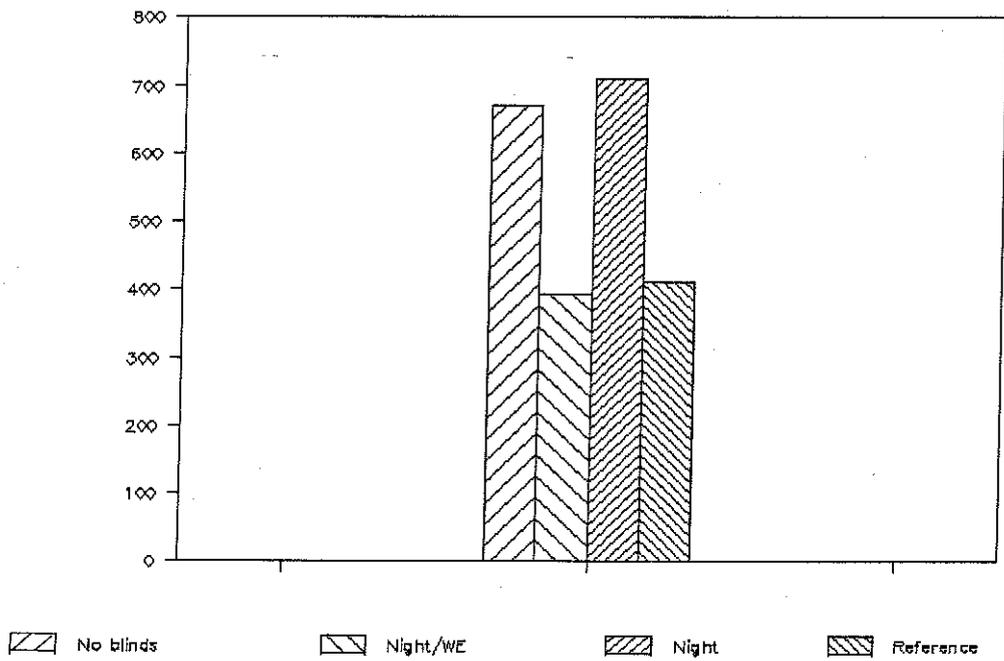


Fig. 5.19. Surchauffe annuelle - Stratégie d'occultation du vitrage

4. Proposition de façade vitrée

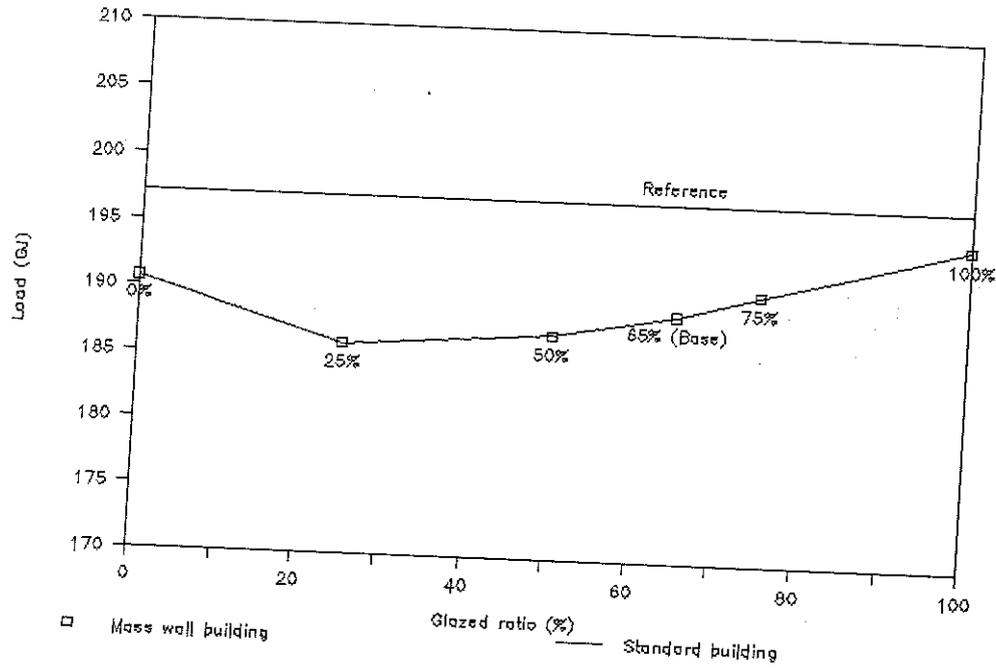


Fig. 5.20. Charge énergétique annuelle - Proposition de façade vitrée

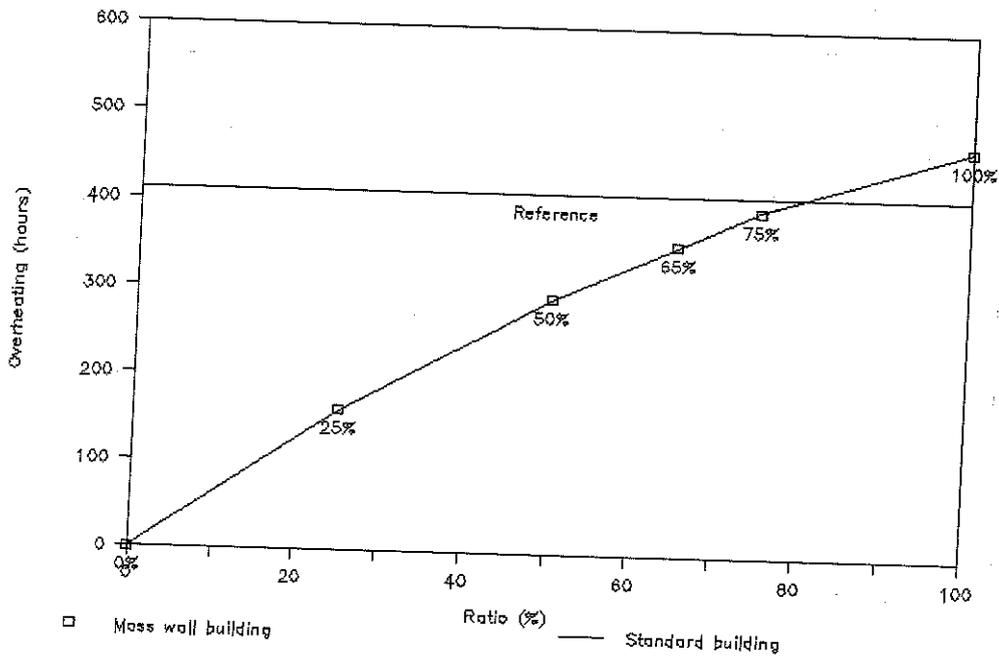
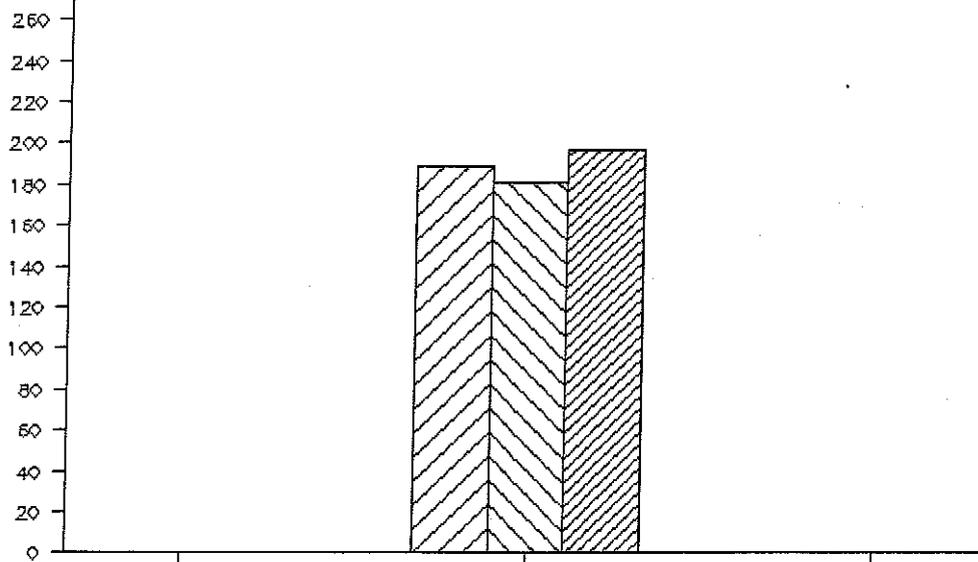


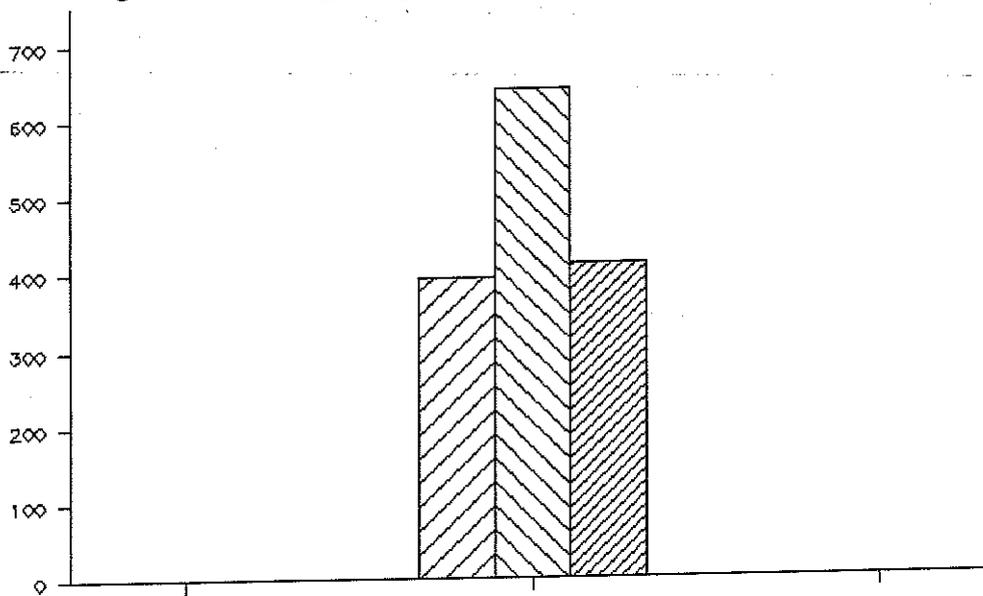
Fig. 5.21. Surchauffe annuelle - Proposition de façade vitrée

5. Géométrie de l'espace-tampon



Base Classical Reference

Fig. 5.22. Charge énergétique annuelle - Géométrie de l'espace-tampon



Base Classical Reference

Fig. 5.23. Surchauffe annuelle - Géométrie de l'espace-tampon

6. Absorption du mur de masse

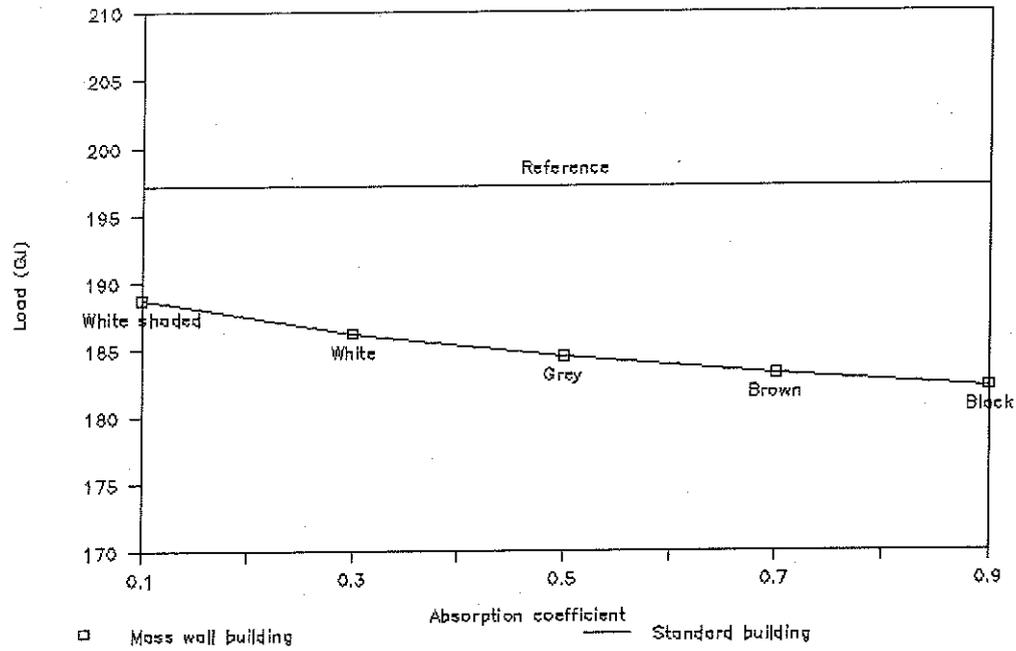


Fig. 5.24. Charge énergétique annuelle - Absorption du mur de masse

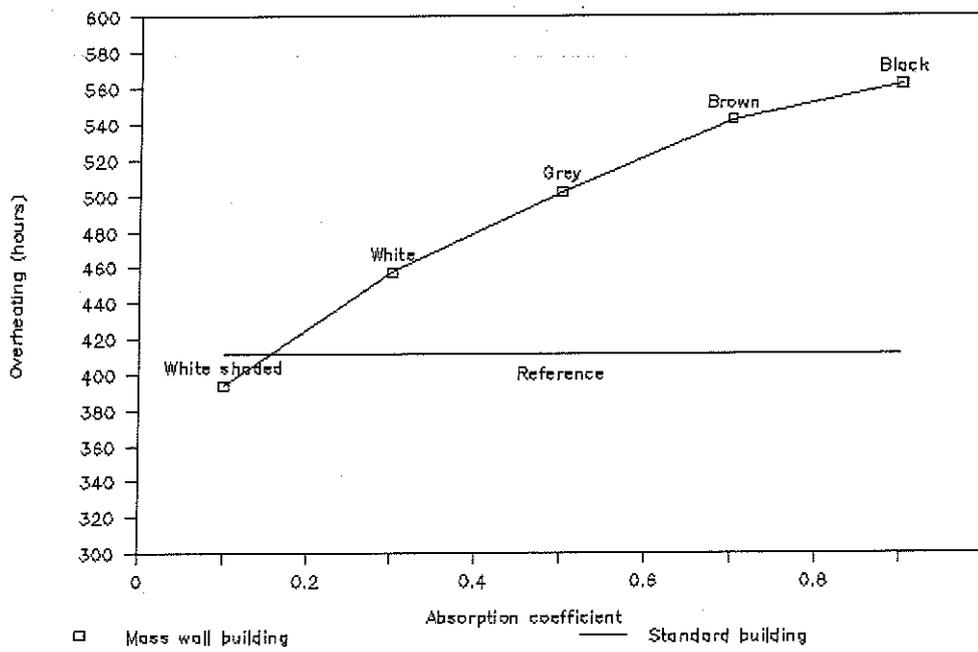


Fig. 5.25. Surchauffe annuelle - Absorption du mur de masse

7. Matériau constitutif du mur de masse

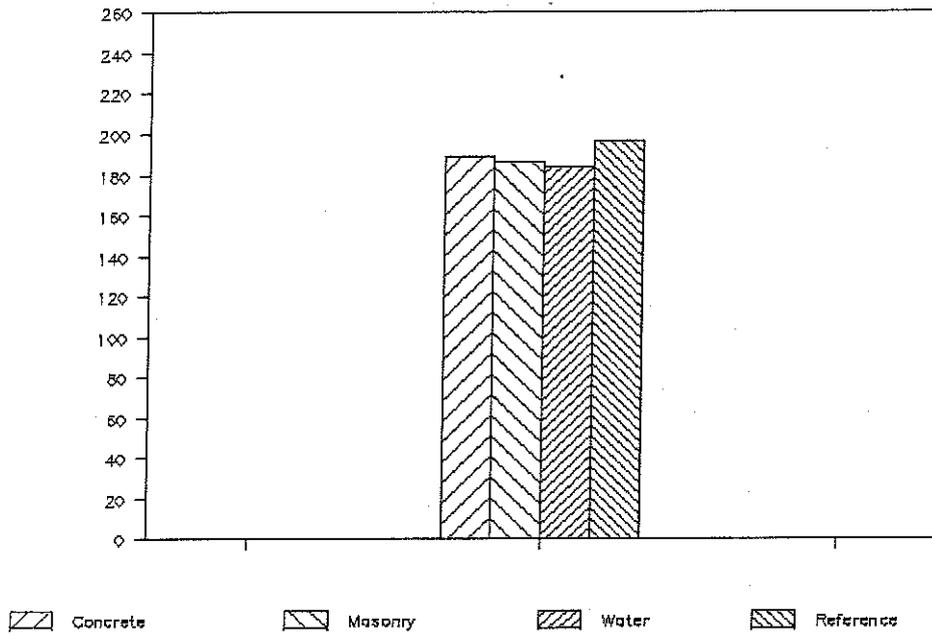


Fig. 5.26. Charge énergétique annuelle - Matériau constitutif du mur de masse

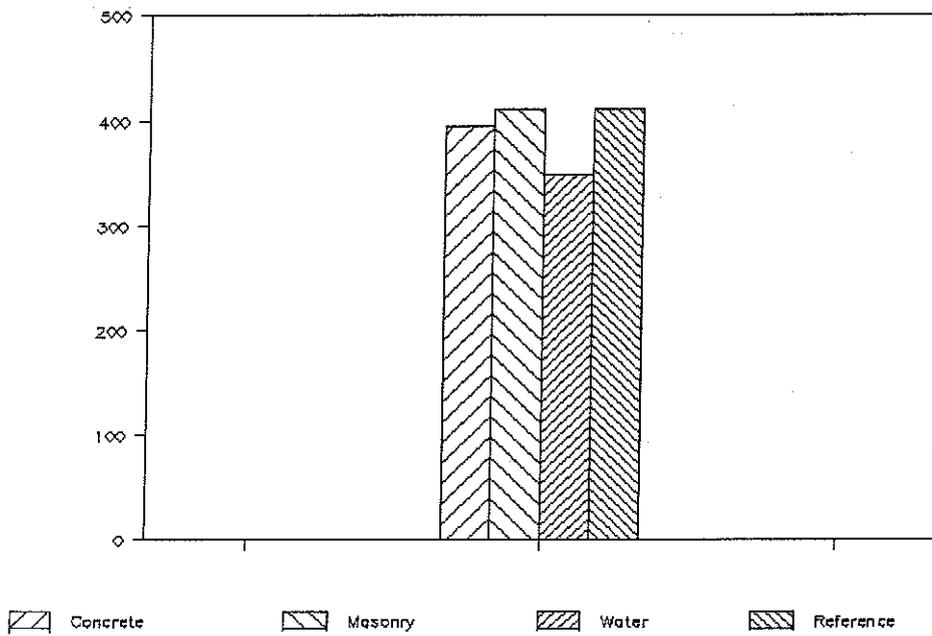


Fig. 5.27. Surchauffe annuelle - Matériau constitutif du mur de masse

8. Epaisseur du mur accumulateur

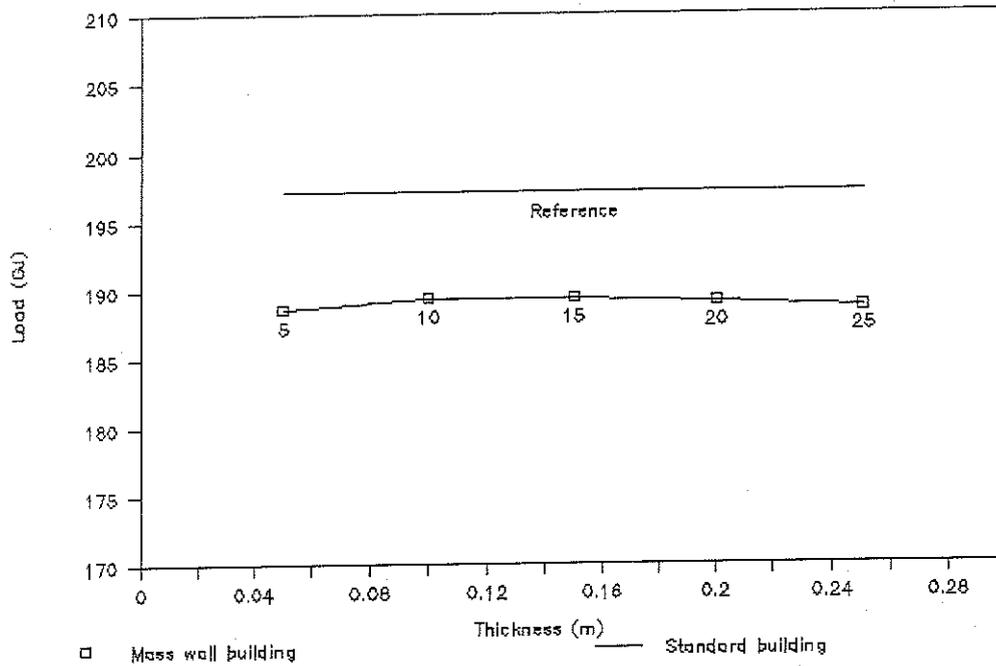


Fig. 5.28. Charge énergétique annuelle - Epaisseur du mur accumulateur

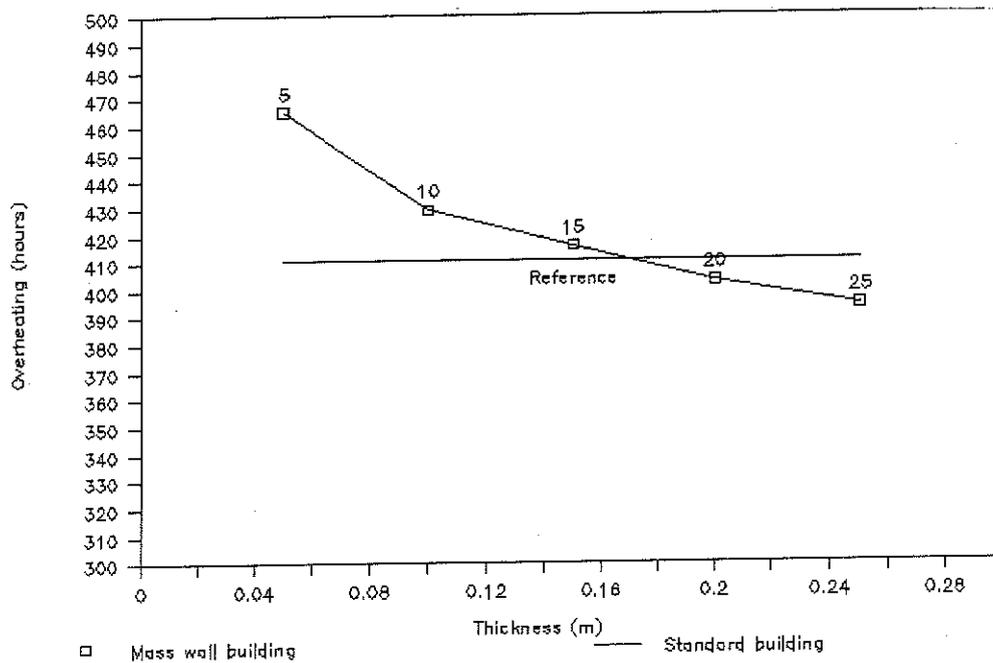


Fig. 5.29. Surchauffe annuelle - Epaisseur du mur accumulateur

9. Isolation du mur de masse

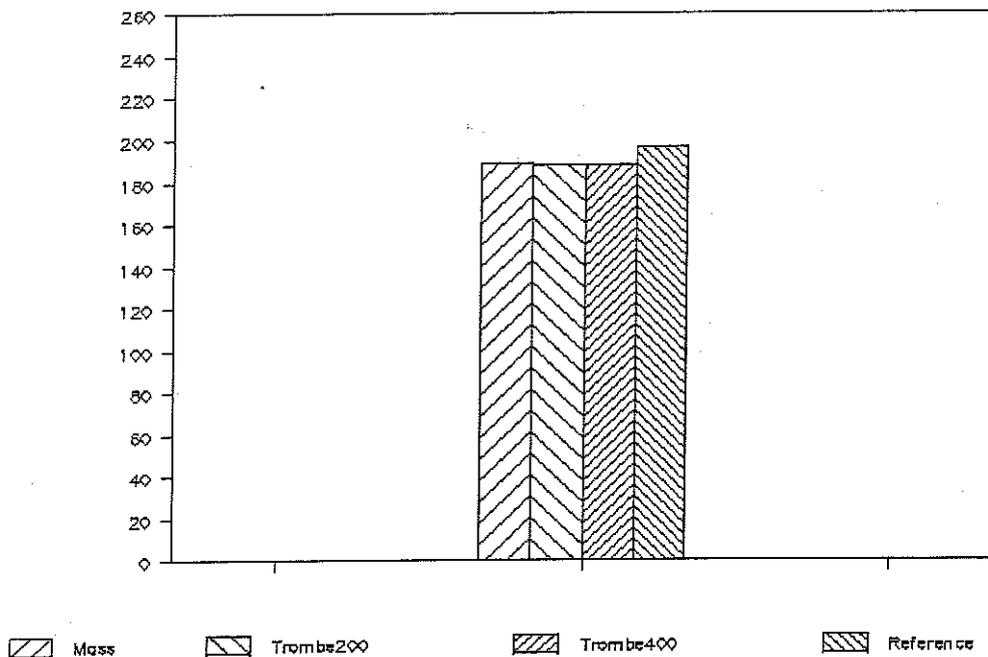


Fig. 5.30. Charge énergétique annuelle - Isolation du mur de masse

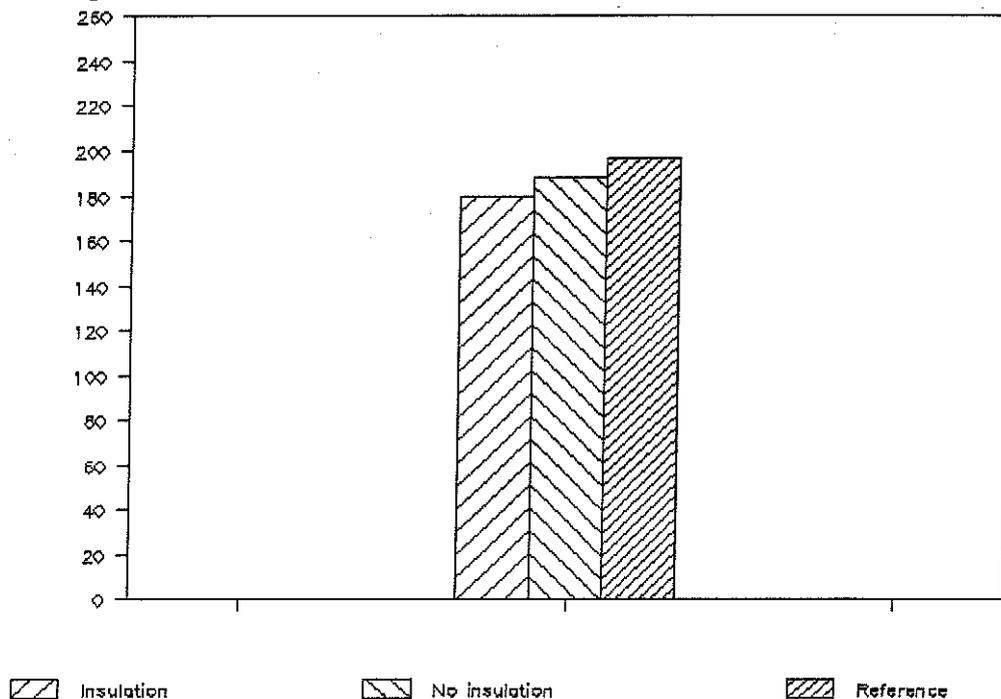


Fig. 5.31. Surchauffe annuelle - Isolation du mur de masse

10. Ventilation de l'espace-tampon

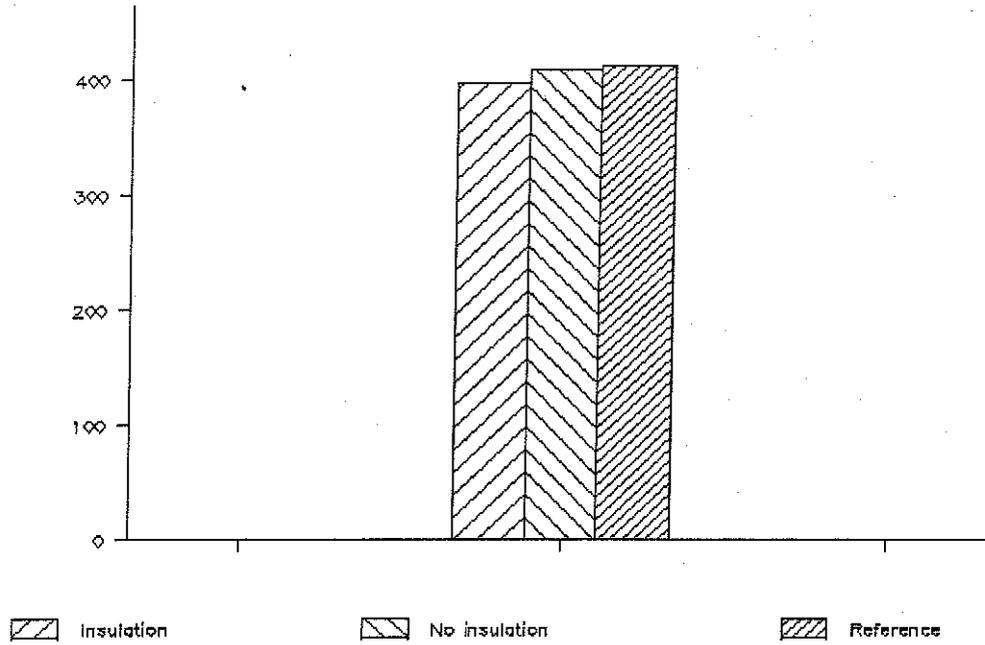


Fig. 5.32. Charge énergétique annuelle - Ventilation de l'espace-tampon

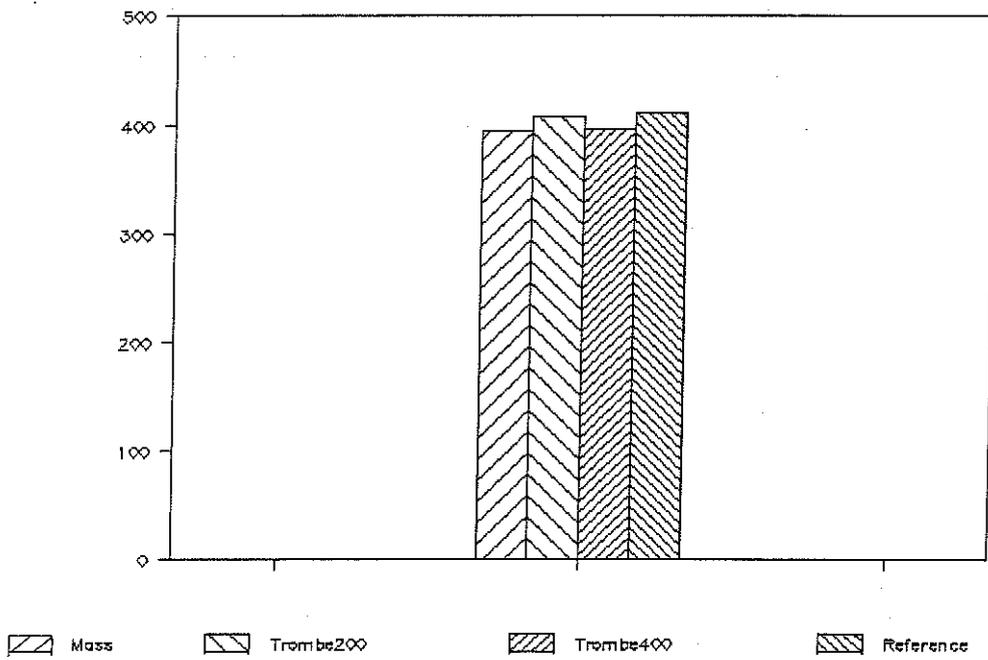


Fig. 5.33. Surchauffe annuelle - Ventilation de l'espace-tampon

11. Climat

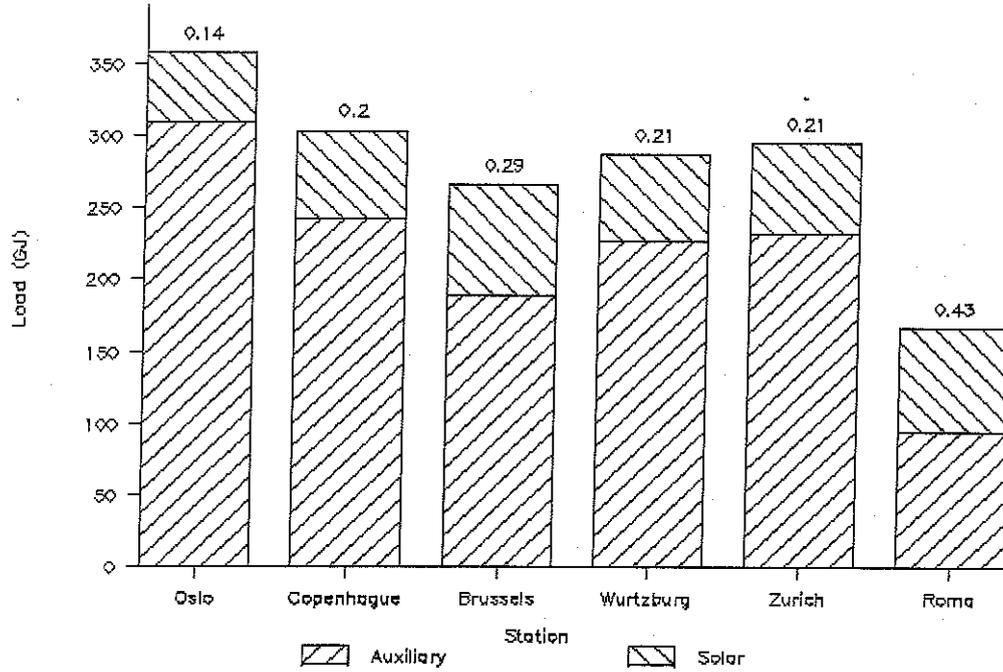


Fig. 5.34. Charge énergétique annuelle - Climat

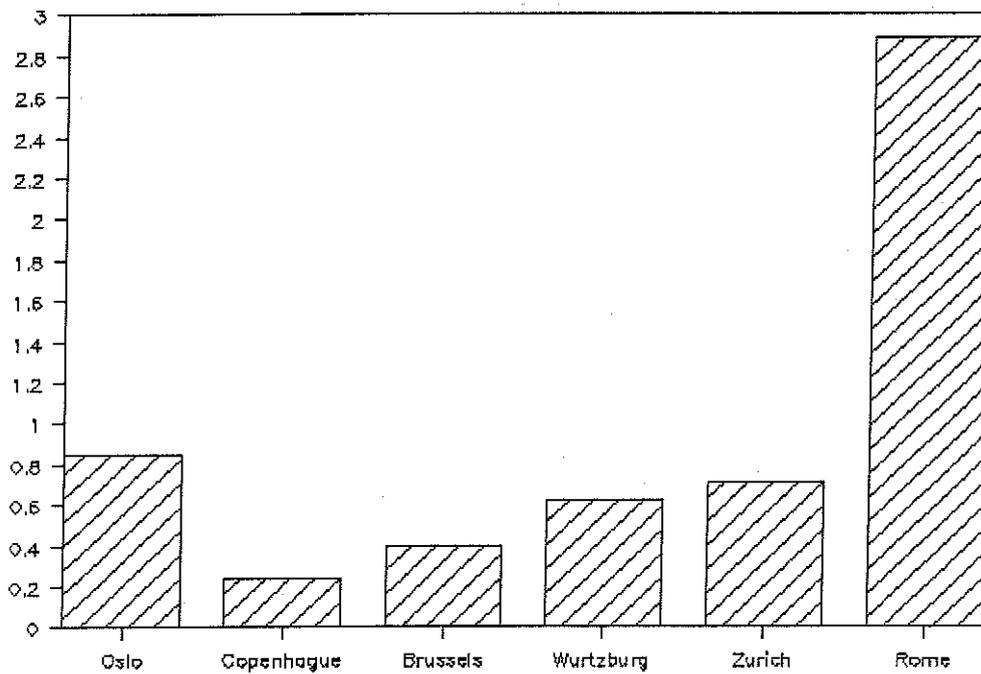


Fig. 5.35. Surchauffe annuelle - Climat

5.5.3.4. Optimisation

L'examen des résultats présentés ci-dessus permet d'orienter le concept d'optimisation du bâtiment dans les directions correspondant aux valeurs individuelles des paramètres optimaux. Pour ce faire, deux approches apparaissent possibles, en se restreignant à un seul critère à optimiser (analyse monocritère).

- Méthode approximative : considérer l'optimum global (ie par rapport à l'ensemble des paramètres) comme étant l'association des optimaux locaux (ie par rapport à chaque paramètre considéré isolément). Cette méthode, simple à mettre en oeuvre, peut conduire à l'obtention d'un optimum qui ne le soit pas réellement.
- Méthode globale : considérer la situation comme un problème d'optimisation à plusieurs paramètres et déterminer la solution par application de techniques classiques, par exemple l'algorithme du simplexe ou l'algorithme du complexe non aléatoire ("Non random complex"). Bouchlagem et Letherman (1990) proposent une telle démarche. Cette méthode impose toutefois l'évaluation du critère à optimiser pour tous les points de l'espace des paramètres successivement considérés par l'algorithme. Il en résulte un temps de calcul extrêmement important qui augmente avec le nombre de paramètres envisagés.

Pour cette raison, seule la première méthode a été mise en oeuvre dans le cadre de ce travail. Il en résulte une définition du design optimum du bâtiment académique FUL qui, pour approximative qu'elle soit, permet néanmoins de cerner les directives vers lesquelles le concepteur doit se diriger. Ainsi, un bâtiment optimisé du point de vue de la charge énergétique présentera les caractéristiques suivantes :

- orientation : sud
- type de vitrage : double, basse émissivité
- proportion de surface vitrée : 25 %
- géométrie de l'espace-tampon : étroite
- couleur des murs : noir
- activation des volets : nuit

Les autres paramètres ne paraissent pas influencer de manière significative la charge énergétique du bâtiment.

Par contre, si le concepteur envisage d'optimiser le bâtiment du point de vue du confort, il retiendra les options suivantes :

- orientation : est
- type de vitrage : triple, basse émissivité
- proportion de surface vitrée : 0 %

- géométrie de l'espace-tampon : large
- couleur des murs : blanc
- épaisseur des mur : 25 cm
- activation des volets : nuit + week end

Les autres paramètres n'affectent pas de manière significative le niveau du confort thermique dans le bâtiment.

Quant à la définition de l'optimum relatif aux deux critères, elle doit tenir compte de pondérations particulières attachées aux deux critères et soit, redéfinir un critère à partir d'une combinaison des critères de départ, soit utiliser simultanément les différents critères par des techniques adaptées d'optimisation multicritère, ce qui sort du cadre de ce paragraphe. Le chapitre 9 approfondit cet aspect lors de la considération de la gestion globale d'un projet.

5.5.4. Simulation de situations non-mesurables (Jacobsen, 1990)

Une autre application potentielle des logiciels de simulation numérique se situe à la frontière de l'expérimentation ou de l'observation. En effet, la simulation permet de réaliser une série d'opérations qui se seraient avérées impossibles à mettre en oeuvre sans l'existence d'un modèle et qui renforcent les résultats de l'analyse expérimentale.

D'une part, la simulation permet de planifier une campagne de mesures. Un modèle de simulation permet en effet de juger a priori de l'influence de certaines variables, de leur dépendance, de la durée requise pour l'expérience, du choix le plus adéquat pour la fréquence d'échantillonnage, de la précision requise pour une mesure donnée. La simulation peut même être réutilisée dans le même but pendant le déroulement d'une campagne de mesure. L'observation de ses résultats permet par exemple de réajuster le plan expérimental, de supprimer l'un ou l'autre capteur, de détecter l'occurrence d'un défaut de fonctionnement à un endroit de la chaîne de mesures et d'y remédier rapidement sans devoir redémarrer la procédure expérimentale. Menées en parallèle, la simulation et l'expérimentation peuvent réellement se renforcer naturellement et aboutir à l'obtention de résultats plus probants.

D'autre part, la simulation permet d'analyser des situations non mesurables ou pour lesquelles la mise en place d'une procédure expérimentale s'avérerait problématique, coûteuse voire impossible. La simulation permet ainsi de modifier légèrement un système et d'extrapoler un résultat pour cette nouvelle situation. La simulation permet aussi de produire une estimation pour des variables non mesurables, soit parce qu'un capteur est non disponible, non calibré, imprévu ou impossible à placer à l'endroit désiré. Dans cette approche, expérimentation et simulation agissent de concert afin d'aboutir à un résultat global amélioré.

5.5.5. Emulation (Hutter *et al.*, 1991)

Une des voies qui associe le plus intimement expérimentation et simulation est procurée par l'émulation. L'émulation consiste à tester un système en remplaçant une partie de ce système par un modèle et en conservant les composants réels pour la partie résiduelle du système. Cette technique est particulièrement d'application dans l'étude des systèmes de contrôle ou de régulation. En effet, les systèmes dans lesquels intervient un mécanisme de contrôle peuvent souvent être séparés en deux parties complémentaires :

- le système à contrôler
- le système de contrôle.

Les deux systèmes sont reliés par une interface qui contient les capteurs de mesure et les actionneurs destinés à appliquer au système contrôlé l'action décidée par les systèmes de contrôle. Les systèmes de contrôle (régulateurs) apparaissent le plus souvent comme des entités compactes et de plus en plus miniaturisées, au contraire des systèmes à contrôler qui peuvent revêtir toute la complexité des systèmes réels. La tentation est grande dès lors de remplacer le système contrôlé par un modèle numérique afin de bénéficier de tous les avantages de la simulation pour tester, à répétition, les qualités du système de contrôle. C'est la stratégie qui est employée dans les simulateurs de vol où un système de contrôle (le pilote) se familiarise avec un système (son avion) dont la réponse est modélisée et calculée par un ordinateur. On pourrait de la sorte appliquer la méthode à toute une série de problèmes environnementaux dans lesquels une phase d'apprentissage (en particulier de l'opérateur humain) est indispensable avant d'aboutir à une maîtrise suffisante du système en question. La méthode offre de plus l'avantage de la souplesse dans la mesure où la frontière entre système réel et simulé peut être variable. C'est ainsi que les senseurs et/ou les actionneurs peuvent, au gré des expérimentations, être inclus dans le système simulé (par un modèle de capteur et/ou d'actionneur) ou apparaître réellement dans le système testé. Il en découle une possibilité de travailler de façon progressive, en incluant de plus en plus d'éléments réels, dans la procédure de test d'un système donné.

Une des applications les plus prometteuses de cette technique se situe dans le domaine de la gestion énergétique des bâtiments (fig. 5.36). Des systèmes de gestion de plus en plus performants, de plus en plus intelligents, les "BEMS" ou Building Energy Management Systems, peuvent en effet être testés en les connectant, par une technique d'émulation, à un modèle du bâtiment qu'ils seront censés contrôler. Des variantes de tous ordres, tant au niveau du système de contrôle qu'au niveau du bâtiment peuvent être expérimentées dans des délais extrêmement courts. Il en résulte une amélioration potentielle incontestable des systèmes mis à la disposition de l'utilisateur (Wang *et al.*, 1992).

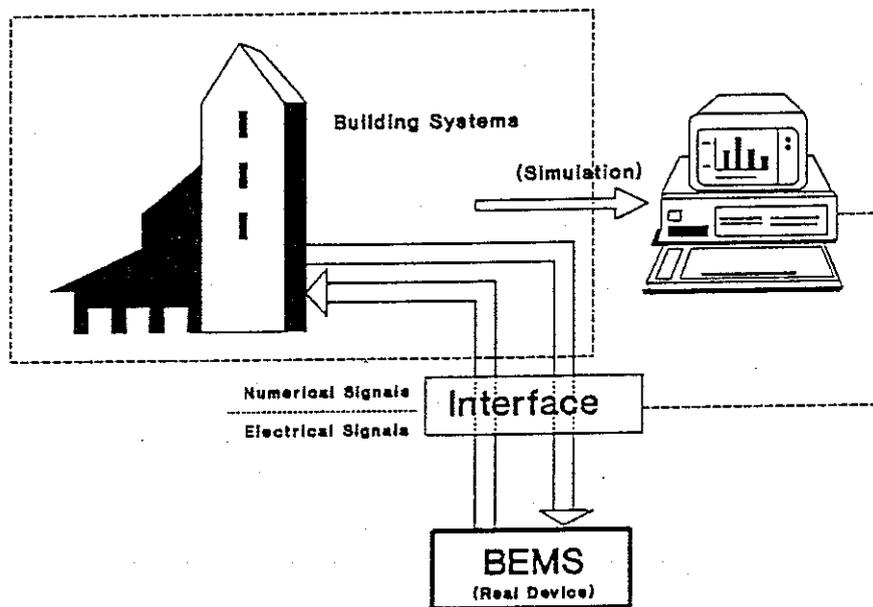


Fig. 5.36. Principe de l'émulation de Systèmes de Gestion Energétique de Bâtiments (extrait de Wang et al (1992))

Dans ce domaine, des travaux importants ont été réalisés dans le cadre du projet "Annex 17" du programme "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" de l'Agence Internationale de l'Energie (voir 1.2.1). Des techniques originales d'émulation de systèmes de gestion énergétique de bâtiments y ont été développées, testées et préparées pour une application industrielle intensive. A titre d'exemple, la figure 5.37 montre la configuration du système mis au point au Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège (Wang et Lebrun, 1991).

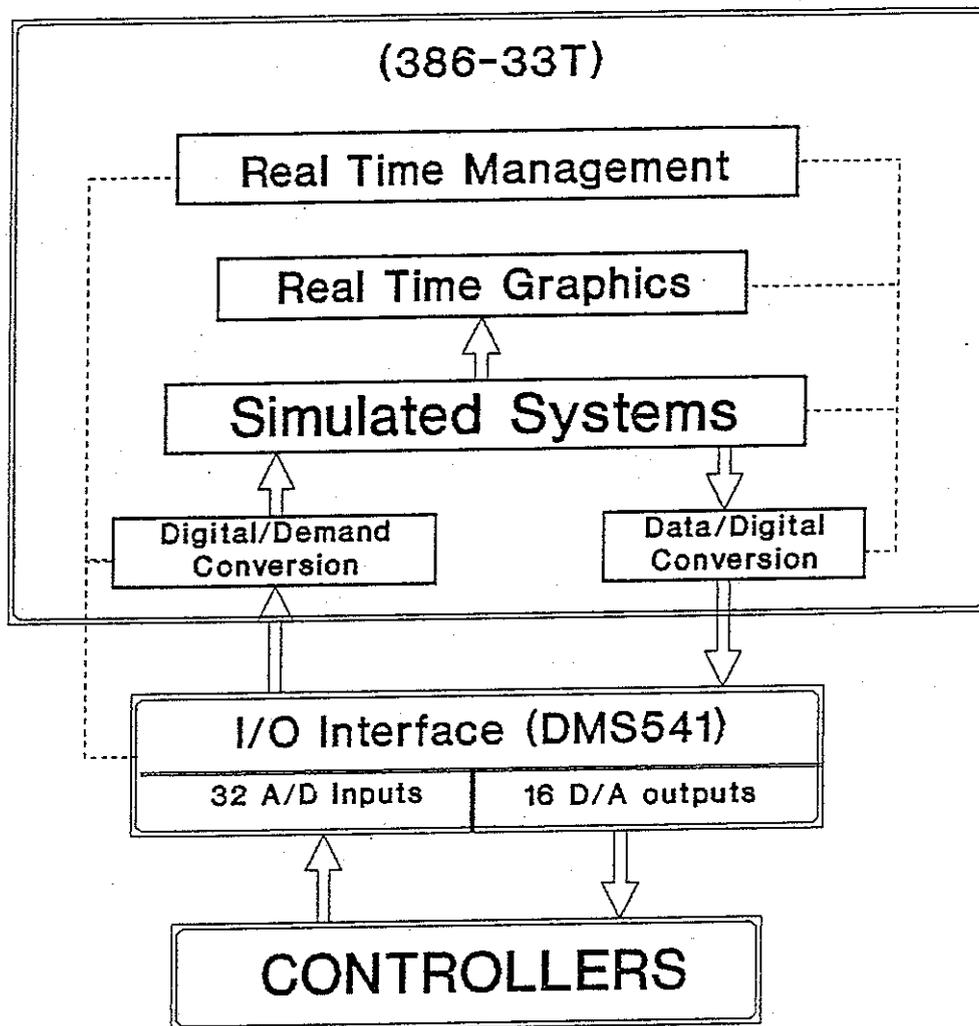


Fig. 5.37. Système d'émulation proposé par le laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège (extrait de Wang et al (1992))

Pour plus de détails, le lecteur intéressé pourra se référer à Wang (1992).

5.6. EXTENSIONS DU LOGICIEL TRNSYS

5.6.1. Introduction

Comme signalé ci-dessus (5.2.2.2), le logiciel TRNSYS se présente sous une forme modulaire et, de plus, extensible. En effet, tout utilisateurs maîtrisant la programmation en Fortran 77 a le loisir d'ajouter des modules supplémentaires, pour autant qu'ils satisfassent à certaines contraintes au point de vue de la communication avec le reste du logiciel (spécifications standardisées des variables d'entrée, d'état, de sortie, des paramètres).

Les chapitres 3 et 4 ont évoqué le développement de modules compatibles avec le logiciel TRNSYS, pour le modèle du mur de masse (voir 3.3.8) et pour différents modèles requis pour l'implémentation d'une stratégie de commande optimale (voir 4.5.2). Les paragraphes suivants ont pour objet de donner quelques informations supplémentaires sur l'intégration de ces modules au sein de TRNSYS.

5.6.2. Modèle du mur de masse

Le développement du modèle du mur de masse a été présenté au chapitre 3 : "Modélisation". Pour l'implémenter sous la forme d'un module TRNSYS, les opérations suivantes devaient être réalisées :

- choix des variables d'entrée du modèle ("INPUTS"). En vue de la plus grande généralisation possible, les variables suivantes ont été retenues :
 1. Coefficient d'échange global avec l'ambiance
 2. Coefficient de transmission thermique du vitrage
 3. Absorption solaire du vitrage (définie comme une variable parce qu'éventuellement variable dans le temps)
 4. Transmission solaire du vitrage (même remarque)
 5. Taux de renouvellement d'air de la serre (même remarque)
 6. Rayonnement solaire global vertical
 7. Rayonnement solaire direct vertical
 8. Température extérieure
 9. Température du local "est"
 10. Température du local "ouest"
 11. Température du local "supérieur"
 12. Température du local "inférieur"
 13. Température du local chauffé
 14. Température des parois du local chauffé

- Choix des variables d'état du modèle ("DERIVATIVES")
 1. Température d'air de la serre
 - 2→2 + n-1 : Températures de la masse du mur

- Choix des variables de sortie du modèle ("OUTPUTS")
 1. Flux convectif (ou globalisé) vers le local chauffé
 2. Flux radiatif vers le local chauffé
 3. Flux absorbé par le mur
 4. Flux échangé vers l'environnement
 5. Température de surface du mur accumulateur, du côté de la serre
 6. Température de surface du mur, du côté du local chauffé
 7. Température de la serre
 - 8→8 + n-1 : Température de la masse du mur

- Choix des paramètres du modèle ("PARAMETERS")
 1. Modes de calcul (coefficients d'échange globalisés ou séparés)
 2. Système d'unités
 3. Longueur du mur
 4. Hauteur du mur
 5. Profondeur du mur
 6. Epaisseur du mur
 7. Coefficient d'échange convectif (ou globalisé) avec le vitrage
 8. Coefficient d'échange convectif (ou globalisé) avec le mur
 9. Emissivité du vitrage, côté intérieur
 10. Emissivité du mur, côté extérieur
 11. Absorption solaire du mur
 12. Capacité thermique du mur
 13. Coefficient d'échange convectif (global) mur-local chauffé
 14. Conductance globale avec le local "est"
 15. Conductance globale avec le local "ouest"
 16. Conductance globale avec le local "supérieur"
 17. Conductance globale avec le local "inférieur"
 18. Nombre de noeuds pour la discrétisation du mur

Au contraire des variables d'entrée, les paramètres sont supposés constants pendant la simulation.

- Implémentation de la procédure de calcul :
 1. Affectation des paramètres
 2. "Lecture" des variables d'entrée (en provenance d'autres modules)
 3. Calcul des coefficients d'échange radiatifs en fonction des températures
 4. Calcul des températures des variables "algébriques"
 5. Calcul des températures des variables d'état
 6. "Ecriture" des outputs (vers d'autres modules)

- Synthèse du travail
L'école française de modélisation thermique des bâtiments a mis en oeuvre le concept de "Proforma" ou fiche signalétique standardisée de description d'un modèle (Dubois, 1991). Les travaux initiaux du projet IEA Annex XXI ont amorcé l'utilisation de ce concept pour la documentation de modèles (Liebecq, 1990). Dans cette optique, une telle fiche a été produite pour le modèle du mur de masse, reprenant les hypothèses de la modélisation décrites au chapitre 3 et les caractéristiques de l'implémentation sous TRNSYS présentées ci-dessus (André, 1990 b).

5.6.3. Modèle du contrôleur optimal

L'application de la théorie de la commande optimale au bâtiment académique de la FUL (voir 4.5.2) a suscité le développement d'un module TRNSYS implémentant la procédure de calcul basée sur le Principe du Maximum de Pontryagin. Ce développement a procédé suivant les mêmes étapes que celles décrites ci-dessus (André, 1992 d).

- Choix des variables d'entrée du modèle ("INPUTS")
 1. Estimation du vecteur d'état
 2. Profil de consigne
 3. Profil des perturbations
- Choix des variables d'état du modèle ("DERIVATIVES").
Aucune. Le système est purement statique.
- Choix des variables de sortie du modèle ("OUTPUTS")
 1. Variables de contrôle calculées par le régulateur
 2. Vecteur d'état du modèle interne au contrôleur
- Choix des paramètres ("PARAMETERS")
 1. Unité logique du fichier des matrices de la représentation d'état du système (A, B, E)
 2. Dimension du vecteur d'état
 3. Dimension du vecteur des perturbations
 5. Horizon d'optimisation
 6. Gain de l'algorithme du gradient
 7. Seuil de convergence de l'algorithme du gradient
 8. Nombre maximal d'itérations autorisé pour l'algorithme du gradient
 9. Borne inférieure du vecteur de contrôle
 10. Borne supérieure du vecteur de contrôle
 11. Début d'activation du vecteur de contrôle
 12. Fin d'activation du vecteur de contrôle

- Synthèse du travail

La figure 5.38 représente le diagramme d'information TRNSYS associé à ce composant. Par ailleurs, une fiche "Proforma" a également été établie pour ce modèle en tenant compte des spécifications émises ci-dessus (André, 1991 d).

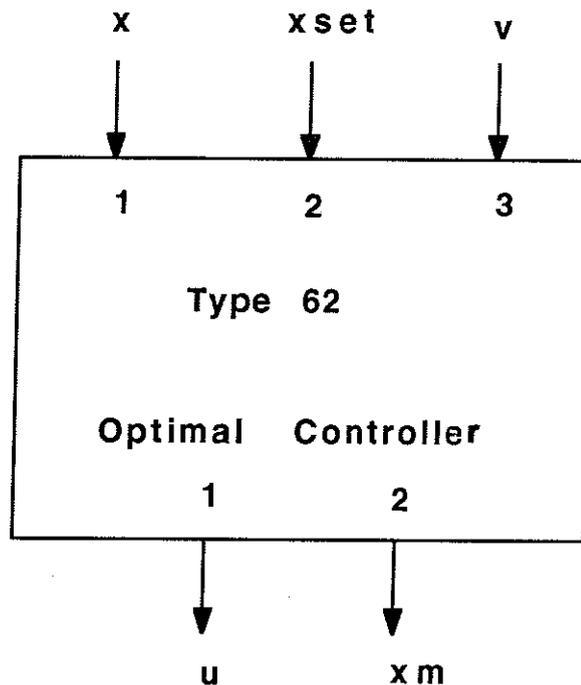


Fig. 5.38. Diagramme d'informations pour le module TRNSYS "Contrôleur optimal"

5.6.4. Modèle du Filtre de Kalman

Dans le cadre de l'implémentation de la commande optimale, un module TRNSYS a également été développé pour représenter le Filtre de Kalman. Pour ce faire, l'algorithme décrit en 4.2.3. a été codé en suivant les prescriptions du logiciel TRNSYS et en donnant lieu aux étapes suivantes (André, 1992 d) :

- Choix des variables d'entrée du modèle ("INPUTS")
 1. Vecteur des variables d'entrée du système
 2. Vecteur des variables de sortie du système

- Choix des variables de sortie du modèle ("OUTPUTS")
 1. Estimation du vecteur d'état
 2. Prédiction du vecteur d'état
- Choix des paramètres ("PARAMETERS")
 1. Unité logique du fichier des matrices de la représentation d'état du système
 2. Dimension du vecteur d'état
 3. Dimension du vecteur d'entrée
 4. Dimension du vecteur de sortie
- Implémentation de la procédure de calcul
 1. Affectation des paramètres
 2. "Lecture" des variables d'entrée (depuis un autre composant TRNSYS)
 3. Prédiction de l'état du système
 4. Prédiction de la matrice de covariance de l'état en système
 5. Estimation de l'état du système
 6. Estimation de la matrice de covariance de l'état du système
 7. "Ecriture" des variables de sortie (vers un autre composant TRNSYS)
- Synthèse du travail

La figure 5.39 représente le diagramme d'information TRNSYS associé à ce composant.

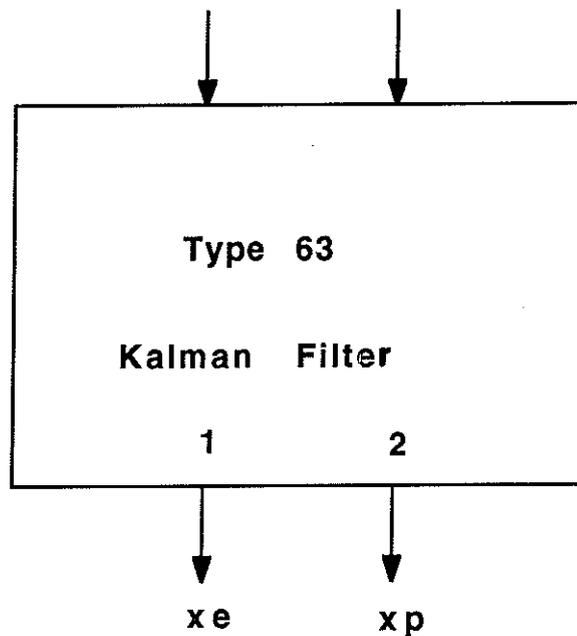


Fig. 5.39. Diagramme d'informations du module TRNSYS "Filtre de Kalman"

5.6.5. Modèle du prédicteur de perturbation

L'algorithme de calcul de la commande optimale déterministe présuppose la connaissance, sur l'horizon d'optimisation, du profil des perturbations à venir. Il en résulte la nécessité de disposer d'un algorithme permettant de réaliser cette prévision.

Le développement du module TRNSYS correspondant, qui n'est d'ailleurs pas encore entièrement opérationnel, envisage le choix entre différentes procédures de prévision :

1. Génération de nombres pseudo aléatoires
2. Génération par un modèle markovien
3. Génération par un modèle de séries temporelles (ARMA, ARIMA, ...)

Dans l'état actuel de son développement, le module prévoit les étapes suivantes :

- Choix des variables d'entrée du modèle ("INPUTS")
 1. Valeur passée du profil des perturbations (sur un horizon donné)
- Choix des variables de sortie du modèle ("OUTPUTS")
 1. Valeur future du profil des perturbations (sur un horizon donné)
- Choix des paramètres du modèle ("PARAMETERS")
 1. Unité logique du fichier des perturbations
 2. Horizon de prévision
 3. Dimension du vecteur des perturbations
 4. Code de l'algorithme de prévision
- Synthèse
La figure 5.40 représente le diagramme d'information TRNSYS associé à ce composant.

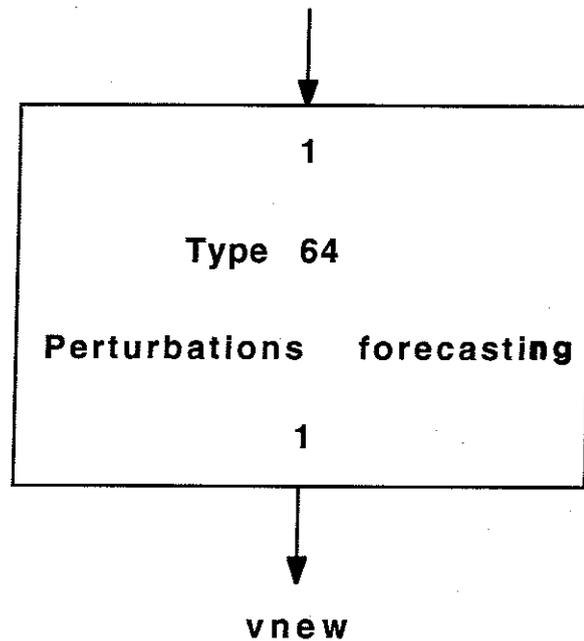


Fig. 5.40. Diagramme d'informations du module TRNSYS "Prévision des perturbations"

5.6.6. Modèle du générateur de consigne

Enfin, un système de contrôle optimal ne peut présenter un caractère complet s'il n'est pas nanti d'une procédure de génération des consignes du contrôleur sur l'horizon d'optimisation. Dans cette optique, un module TRNSYS a également été développé permettant de réaliser cette opération à travers la séquence suivante (André, 1992 d) :

- Choix des variables d'entrée du modèle ("INPUTS")
Aucune variable n'a été retenue
- Choix des variables de sortie du modèle ("OUTPUTS")
 1. Le profil de consignes à générer sur l'horizon d'optimisation

- Choix des paramètres du modèle ("PARAMETERS")
 1. Horizon de génération de la consigne, qui correspond en principe à l'horizon d'optimisation du système
 2. Valeur de consigne lorsque le système est "ON"
 3. Valeur de consigne lorsque le système est "OFF"
 4. Heure de démarrage du système
 5. Heure d'arrêt du système
 6. Jour de la semaine auquel correspond le début de l'application des conditions de "semaine"
 7. Jour de la semaine auquel correspond le début de l'application des conditions de "week-end"
- Synthèse du travail

La figure 5.41 représente le diagramme d'information TRNSYS associé à ce composant.

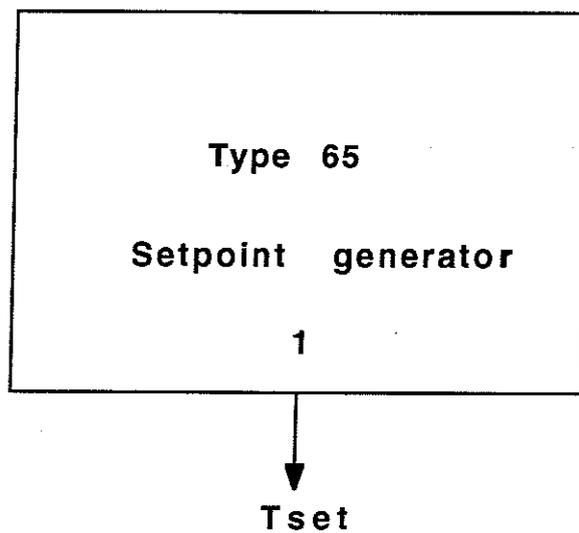


Fig. 5.41. Diagramme d'informations du module TRNSYS "Générateur de consignes"

5.7. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

La simulation numérique n'est pas l'apanage de la thermique du bâtiment. Tous les domaines scientifiques, à tout le moins les sciences "exactes" peuvent bénéficier de ses avantages. A ce titre, toutes les considérations émises au chapitre 3 "Modélisation" et au chapitre 4 "Analyse des systèmes", demeurent d'actualité dans la mesure où la simulation numérique est présentée, dans ce texte, comme la mise en commun de ces techniques en vue de représenter, dans un ordinateur, le comportement de tout système réel. La connexion avec le chapitre 2, "Observation", déjà présente en thermique du bâtiment de par les opérations de validation et de calibration, se renforce encore si l'on traite de problèmes environnementaux. En effet, la complexité, la pluridisciplinarité de tels systèmes engendrent une impossibilité totale de procéder à la moindre simulation si les données de l'expérience n'interviennent pas. Plus que dans tout autre domaine, la simulation de systèmes environnementaux se nourrit de la mesure et se doit de s'y voir confrontée, sans quoi les résultats peuvent rapidement devenir aléatoires : la probabilité de ne pas tenir compte d'un aspect du problème grandit avec la complexité des phénomènes investigués et avec elle l'incertitude sur les résultats de l'application de la méthode de calcul (Caswel, 1976).

Nonobstant ces restrictions, des logiciels de simulation numérique ont vu le jour pour une foule de problèmes d'environnement. A titre d'exemple, et seulement à titre d'exemple, mentionnons les travaux de Jansson (1991) dans le développement d'un logiciel de simulation du comportement thermique et hydrique des sols ("SOIL"), ou encore les travaux (TA-Luft, 1986) à l'origine du développement d'un logiciel de prévisions d'immissions pour les polluants de sources ponctuelles et linéaires ("IMMPROG"); enfin, les travaux à la base du développement d'un logiciel de simulation de la propagation du bruit ("RAYNOISE"). Les considérations émises ci-dessus imposent évidemment l'octroi d'une attention toute particulière aux étapes de la validation et de la calibration des logiciels, seules garantes d'une utilisation réellement efficace de ces produits.

5.8. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre s'inscrit avant tout comme la dernière partie d'un édifice amorcé par ses trois prédécesseurs. A ce titre, il ferme la boucle et permet aux techniques, informatisées ou informatisables, de la mesure et de la modélisation, de déboucher sur une utilisation potentielle valide dans le contexte de l'approche d'un problème environnemental. En effet, ce chapitre a non seulement abordé la problématique de la simulation numérique mais, surtout, l'a reliée aux concepts de mesures et de modèles par l'intermédiaire des opérations de validation et de calibration, indispensables pour garantir la fiabilité des résultats de la

procédure. Les applications potentielles des logiciels disponibles ont été discutées de même que des considérations relatives à la généralisation de l'approche.

Ce chapitre clot également la présentation du premier acteur du logiciel intégré. Si l'on se réfère à la figure 1.1, la démarche proposée dans cette thèse met en effet l'accent sur l'association des ressources informatiques permettant de tirer parti des techniques de la mesure, de la modélisation, de l'analyse des systèmes et de la simulation, ces quatre chapitres formant dès lors un ensemble cohérent et qui ne peut être envisagé en-dehors de cet aspect intégrateur. A travers ces chapitres, notre but était moins de montrer l'application individuelle des différentes méthodes aux problèmes d'environnement et de conception de bâtiments que de mettre en évidence la nécessité d'associer ces méthodes afin d'améliorer leur capacité et de renforcer mutuellement leurs points faibles.

CHAPITRE 6.

BASES DE DONNÉES

6.1. INTRODUCTION

La majorité des problèmes techniques, en particulier les problèmes liés à l'environnement, véhiculent une quantité impressionnante de données. Celles-ci proviennent le plus souvent des mesures réalisées sur le terrain ou en laboratoire mais également de l'application des processus de traitement des données ou des procédures de simulation numérique. Leur utilité n'apparaît pas moins importante que leur quantité ou leur diversité. Les données recueillies peuvent être fournies comme telles, sans le moindre traitement; elles peuvent également donner lieu à des investigations de nature statistique qui permettront de dériver des indices pertinents à partir de la situation observée. Les données pourront servir également à l'utilisateur de logiciels de simulation, souvent gros consommateurs de variables d'entrée. Enfin, l'application d'une procédure d'expertise s'appuie sur des faits qui traduisent, dans un langage approprié, la réalité observée, qualifiée ou quantifiée dans des variables.

Il résulte du caractère omniprésent de la notion de données la nécessité de disposer de mécanismes ou d'outils aptes à gérer et à manipuler ce type d'information. La généralisation de la disponibilité de l'outil informatique a engendré le développement d'un nombre croissant de dispositifs de stockage de données (les "bases de données") et de logiciels dédiés à leur manipulation (les "Systèmes de Gestion de Bases de Données" ou SGBD). Parmi ces derniers, certains se sont imposés ou s'imposent comme des standards, nécessité devenue encore plus cruciale de par la prolifération et la ramification des réseaux informatiques qui permettent une connexion rapide et aisée entre des postes de travail situés en des endroits géographiquement très éloignés. La science de la télématique a réellement permis une avancée décisive de l'accessibilité aux bases de données pour des utilisateurs de plus en plus nombreux.

Le présent chapitre a pour objet de présenter et d'illustrer le développement et l'utilisation de bases de données dans le domaine environnemental en s'appuyant sur un exemple issu de la physique du bâtiment. Dans le cadre de ce travail, une base de données concernant les propriétés thermophysiques des matériaux de construction et un logiciel de gestion de cette base de données ont été développés afin de faciliter, dans un premier temps, l'introduction des informations dans un programme de simulation numérique tel que MBDSA (voir chapitre 5). Cet exemple, restreint au départ, a permis de mettre en place une démarche et un outil susceptibles d'être réutilisés dans toute une gamme de problèmes donnant lieu au stockage et à la manipulation de l'information.

6.2. FONDEMENT DE LA THÉORIE DES BASES DE DONNÉES (WIEDERHOLD, 1977)

6.2.1. Introduction

La terminologie "Base de données" s'applique tout autant à une collection de données mutuellement reliées qu'au support informatisé qui la contient ou au programme qui la manipule. Ceci peut évidemment introduire une certaine confusion. Dans la suite, nous parlerons de la "base de données" comme de la collection d'informations et du système de gestion comme du logiciel qui manipule l'information.

La figure 6.1 montre le schéma général d'une base de données et distingue la notion de connaissance préalable ("knowledge") de celle d'information ("information") qui résulte d'un traitement de cette connaissance par le système de gestion ("processing procedure") associé à la base de données proprement dite ("files").

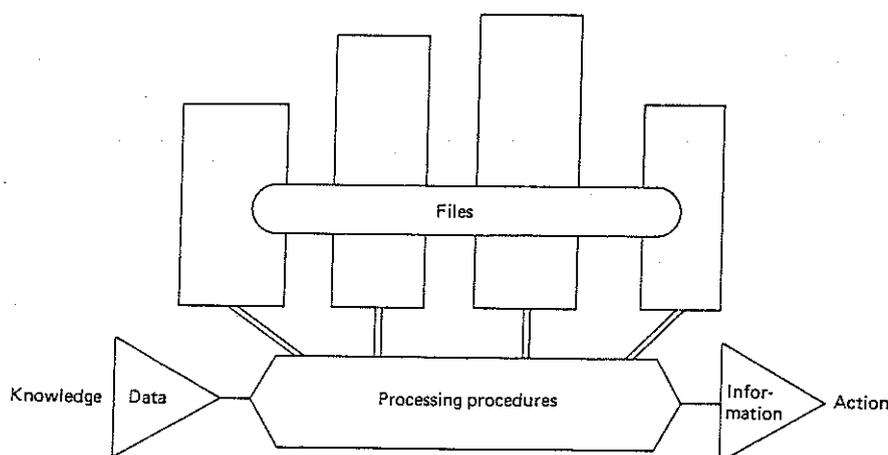


Fig. 6.1. Structure d'une base de données (d'après Wiederhold (1977))

Même si cela n'est pas obligatoire, une approche de type "Base de données" ne se conçoit réalistement qu'à partir du moment où la quantité d'informations à manipuler devient grande, voire très grande. Pour cette raison, une base de données ne peut se construire sans une importante réflexion préalable à propos des différents aspects à considérer successivement pour son élaboration. Dans cette optique, les étapes suivantes apparaissent essentielles et seront discutées plus en détail dans les prochains paragraphes :

- organisation de la base de données
- schéma de la base de données
- implémentation de la base de données
- utilisation de la base de données
- problèmes particuliers : fiabilité, protection, intégrité

6.2.2. Organisation de la base de données

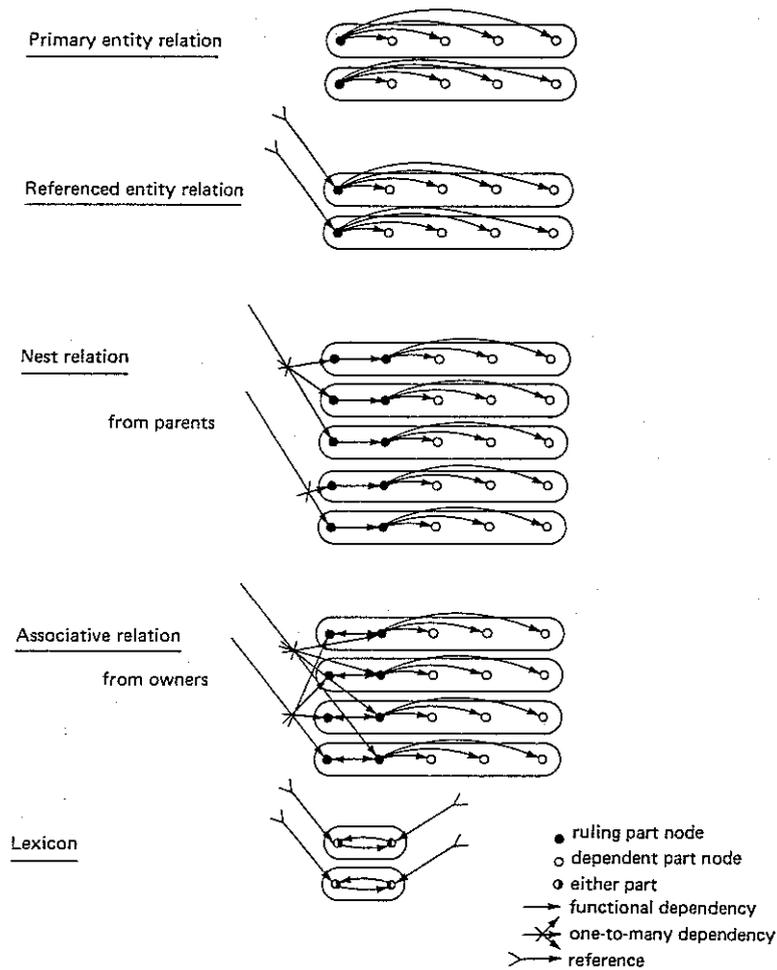


Fig. 6.2. Représentation schématique des modèles conceptuels de données (d'après Wiederhold (1977))

La première étape de la conception d'une base de données se déroule à un niveau purement conceptuel et aborde la question de l'organisation ou de la structure de la base de données. A la base de cette démarche se situe le problème du choix d'un "modèle de données" ("data model") qui permette de représenter l'information souhaitée de manière efficace. Un modèle de données est constitué de données élémentaires et de relations entre ces données élémentaires. L'ensemble forme une entité caractérisée par des attributs et des relations. Les modèles de données diffèrent entre eux par la manière dont ces concepts sont définis, autrement dit par la sémantique des relations. Ainsi, on distingue les modèles suivants :

- Entités-relations: une entité-relation définit un ensemble d'objets ou d'entités. Par exemple, l'entité-relation "Employé" définit les objets "nom", "date de naissance", "taille", "travail".
- Lexicons: un lexicon est basé sur une correspondance bijective entre deux ensembles d'objets A et B. Il s'agit en réalité d'une relation d'équivalence. Par exemple, la correspondance entre une liste de numéros de téléphone et une liste d'abonnés constitue un lexicon.
- Relations imbriquées: Il s'agit d'une inclusion de relations. Par exemple, la relation "employé" définie ci-dessus peut inclure une autre relation "enfant" qui définit les enfants associés à un employé.
- Relations référencées: Dans ce cas, une entité-relation fait référence à une autre entité-relation: les relations sont chaînées les unes aux autres.
- Relations associatives: Une relation associative associe des objets issus d'autres entités-relations pour créer une nouvelle entité-relation constituée de ces objets "hérités" et d'autres objets qui lui sont propres.

La figure 6.2 représente, suivant le formalisme de Bachman, les schémas conceptuels associés à ces modèles.

A partir du modèle de données retenu, il y a lieu de définir les opérations qui pourront être effectuées sur le modèle. Les notions utilisées pour la définition de ces opérations ressortent à la théorie des ensembles et en empruntent le vocabulaire. Le but de l'application de ces opérations consiste en la possibilité de créer de nouvelles relations à partir de celles comprises dans le modèle. Dans le cas où le domaine de deux relations est identique, les opérations classiques d'union, d'intersection et de différence pourront s'appliquer (fig. 6.3).

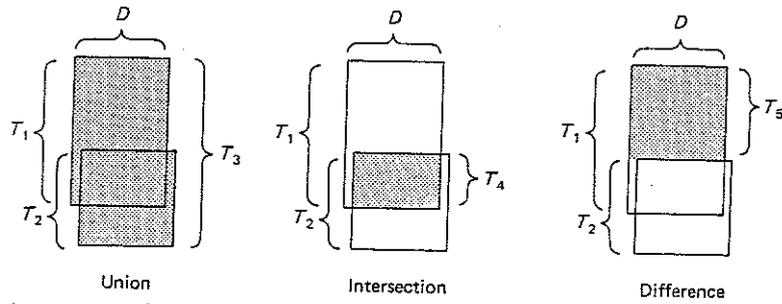


Fig. 6.3. Opérations d'union, d'intersection et de différence sur des modèles conceptuels de données (d'après Wiederhold (1977))

Par contre, dans le cas de domaines disjoints, on pourra définir une nouvelle relation par restriction du domaine d'une relation (opération de projection) ou par combinaison des données élémentaires de deux relations (opérations de jointure).

Les figures 6.4 et 6.5 représentent schématiquement ces opérations.

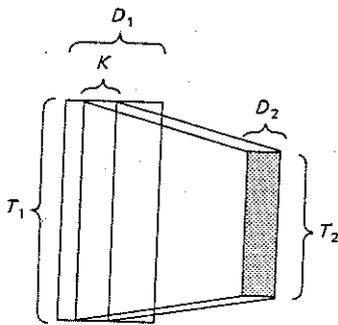


Fig. 6.4. Opération de projection d'une relation [d'après Wiederhold (1977)]

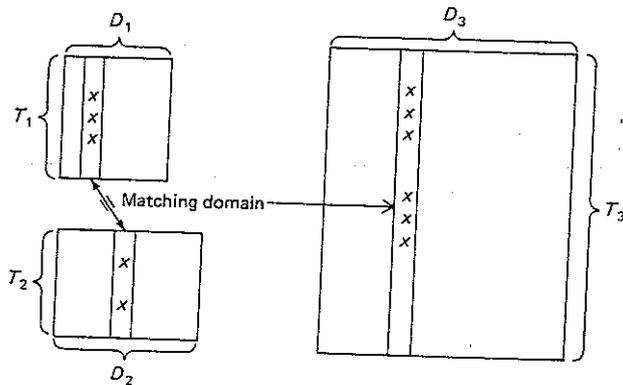


Fig. 6.5. Opération de jointure de deux relations [d'après Wiederhold (1977)]

Enfin, une dernière caractéristique importante des modèles de données concerne la séquence suivant laquelle les différentes relations apparaissent. Cette notion de séquence induit la définition de nouvelles opérations aptes à manipuler ou à transformer cette séquence. Il s'agit d'un problème crucial dans la mesure où l'implémentation (voir 6.2.4) d'un modèle conceptuel va assigner à ce modèle un emplacement physique, ce qui engendre automatiquement une influence plus importante de l'ordre dans lequel les relations sont définies.

Lorsque les modèles pour les différentes données à inclure dans une base de données ont été choisis, il convient alors de les combiner en vue de produire le modèle, toujours conceptuel, de la base de données. Cela se réalise par une opération de jointure, comme représenté par la figure 6.6.

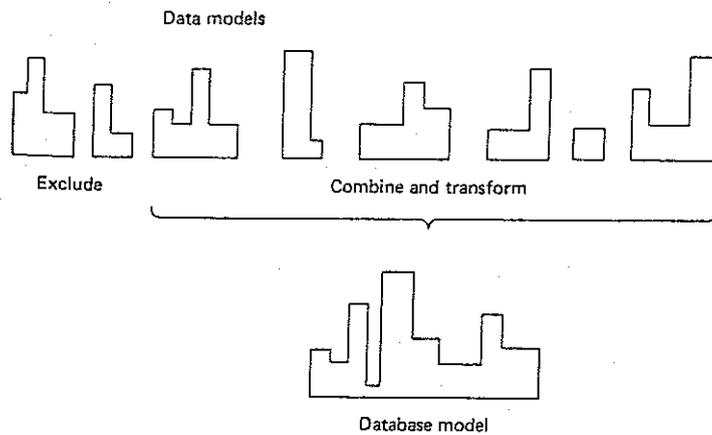


Fig. 6.6. Construction d'un modèle de base de données par jointure de différents modèles de données élémentaires (d'après Wiederhold (1977))

Cette opération engendre la nécessité de définir des macro-relations entre les relations sous-tendant les modèles de données élémentaires en poursuivant l'un ou l'autre de ces objectifs :

- Maximiser la clarté sémantique
- Minimiser le nombre de relations
- Minimiser le nombre d'entités
- Minimiser le nombre de données élémentaires
- Minimiser les connections entre relations et attributs partagés.

6.2.3. Schéma de la base des données

En vue de procéder à l'implémentation du modèle conceptuel défini au paragraphe précédent, il importe de définir le schéma de la base de données, à savoir une information qui permette la détermination du type et de la position des données élémentaires. Ceci revient à donner un nom aux données élémentaires, à la caractériser par un type (caractère, décimal, entier, pointeur, binaire) et éventuellement par d'autres descripteurs (titre, unité, valeurs par défaut, ...). L'ensemble de cette information pour toutes les données élémentaires constitue

le schéma de la base de données. Il se complète d'une information relative à la structure de la base de données, c'est-à-dire à la hiérarchisation des données élémentaires. Nanti de cette information, le modèle est alors prêt à subir son implémentation.

6.2.4. Implémentation de la base de données

La dernière étape permettant de mettre une base de données à la disposition de ses utilisateurs concerne son implémentation. Ceci inclut le développement du système de gestion de la base de données et va rendre totalement transparent pour l'utilisateur les notions de modèles et de schéma. L'implémentation poursuivra en réalité quatre objectifs :

1. La capacité de repérer une donnée sans connaître la structure des fichiers de la base de données.
2. La capacité de changer un enregistrement ou la structure des fichiers sans altérer le programme de gestion.
3. La capacité de manipuler des fichiers liés les uns aux autres dans une même opération.
4. Une description de la base de données qui intègre différents points de vue;

L'implémentation constitue la partie la plus variable dans les systèmes de gestion de bases de données existant. Chaque système possède une implémentation particulière qui lui est propre.

6.2.5. Utilisation de la base de données

Une base de données ne possède pas de raison d'être si elle ne répond pas à un besoin de la part des utilisateurs. La partie essentielle de l'utilisation d'une base de données est la méthode utilisée par le système pour retrouver une information à partir d'une demande formulée par l'utilisateur. Les méthodes de recherche de l'information émergent à 3 catégories :

- Recherche de faits
- Inférence statistique
- Inférence déductive à partir des relations

Du point de vue de l'utilisateur, la formulation de la requête peut revêtir différents aspects :

- Réponse à des questions formulées par le système
- Sélection dans des menus à choix multiples
- Utilisation d'un langage de requête
- Formulation de la requête en langage naturel.

Enfin, les systèmes peuvent différer d'après le système de base de données utilisé :

- Relationnel
- Hiérarchisé
- En réseau

6.2.6. Problèmes particuliers

A l'instar de nombreux systèmes informatiques, les systèmes de gestion de bases de données doivent prêter une attention particulière aux phénomènes suivants :

- Fiabilité : détection des erreurs, contrôle des pannes, restauration du système, amélioration par redondance
- Protection : discrétion des données, restriction des droits d'accès, établissement de clés et/ou de codes d'accès à l'information
- Intégrité : elle vise à l'absence de données inconsistantes. Des précautions particulières doivent être prises en période de modification de la base de données afin d'éviter l'existence de telles données (par exemple, bloquer l'accès à la base de données tant que la procédure d'adaptation n'est pas clôturée).

6.3. DÉVELOPPEMENT D'UNE BASE DE DONNÉES POUR LES CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

6.3.1. Motivation

Les logiciels de simulation du comportement thermique des bâtiments nécessitent l'introduction des propriétés thermophysiques (conductivité thermique, capacité thermique, densité) des matériaux mis en oeuvre dans le bâtiment. Pour un bâtiment de taille moyenne, ce besoin peut rapidement résulter en la collection d'une information importante et, de

surcroît, répétitive d'un projet à l'autre. Pour cette raison, il a paru utile d'informatiser le processus et de construire une base de données accompagnée d'un logiciel de gestion (André, 1993 b). Le logiciel a reçu le nom de "BMW" ("Building Material and Walls) étant donné qu'il renferme également des bases de données relatives aux parois-types et aux éléments de construction (portes, fenêtres) les plus courants.

6.3.2. Développement de la base de données

Le développement de la base de données "matériaux de construction" a commencé par la collecte de l'information nécessaire. Pour ce faire, le travail a utilisé le catalogue établi par le CSTC (Ministère de la Région Wallonne, 1987). Cette référence procure une liste hiérarchisée de la plupart des matériaux utilisés dans le secteur de la construction, accompagnés des valeurs de leurs caractéristiques hygrothermiques. Elle a servi de base de travail et a conduit à l'élaboration d'un fichier.

Si l'on se réfère aux considérations théoriques du paragraphe précédent, le modèle de données sous-jacent est du type "entité-relations". En effet, un enregistrement dans la base de données contient les 9 champs suivants :

- Nom du matériau
- Conductivité thermique à l'état sec
- Conductivité thermique à l'état humide
- Densité minimale
- Densité maximale
- Capacité thermique à l'état sec
- Capacité thermique à l'état humide
- Résistance thermique si matériau hétérogène
- Source de l'information

La définition du schéma de la base de données a associé à chacun de ces champs un type de données suivant la table suivante :

1. CARACTERE (25)
2. REEL
3. REEL
4. REEL
5. REEL
6. REEL
7. REEL
8. REEL
9. CARACTERE (10)

En l'occurrence, il s'agit d'une base de données relativement restreinte (elle contient environ 200 enregistrements) mais qui permet néanmoins d'illustrer la plupart des concepts évoqués au paragraphe précédent.

6.3.3. Implémentation et développement du logiciel de gestion

Le cahier des charges du logiciel de gestion de la base de données a prévu essentiellement trois fonctionnalités :

- consultation des propriétés d'un matériau donné
- recherche du matériau possédant un ou plusieurs attributs donnés
- calcul de grandeurs connexes : calcul du coefficient "K" d'une paroi à partir des propriétés des matériaux.

Pour réaliser l'implémentation de ces fonctionnalités, une structure hiérarchisée (un arbre de recherche) a été associée au fichier des matériaux de façon à ce que chaque enregistrement corresponde à une extrémité de cet arbre. La première subdivision de l'arbre comprend 10 catégories de matériaux :

1. Métaux
2. Pierres naturelles
3. Béton
4. Maçonnerie
5. Enduits
6. Bois
7. Isolants
8. Matériaux préfabriqués
9. Matériaux de couverture
10. Matériaux divers

Chaque catégorie se subdivise alors en plusieurs sous-catégories et la procédure se répète de façon à caractériser univoquement un matériau. La partie la plus hiérarchisée de l'arbre contient jusqu'à 6 niveaux. La figure 6.7 représente une partie de cet arbre pour le cas du béton.

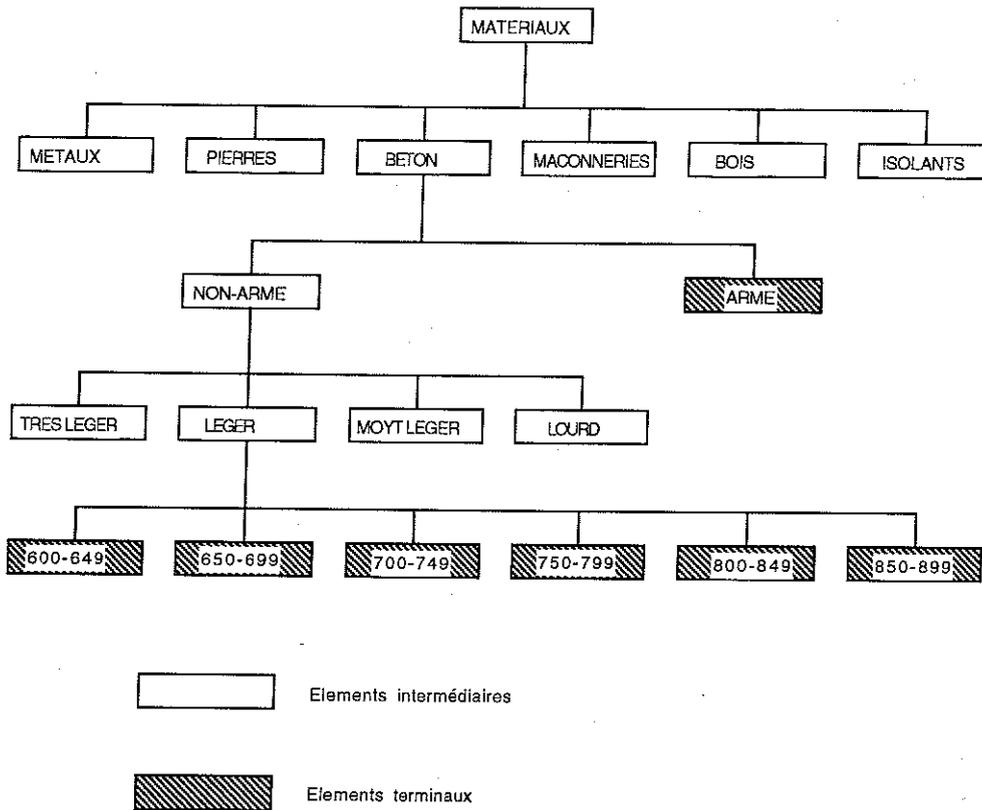


Fig. 6.7. - Vue d'une partie de l'arbre sous-jacent à la base de données "BMW"

Cette structure est représentée par des relations entre les noeuds de l'arbre sous la forme de couples (père, fils). Le mécanisme de recherche recense, à un niveau donné, tous les fils d'un même père et, de proche en proche, jusqu'à l'atteinte de la dernière génération. A ce stade, l'élément atteint (terminal) est directement relié à l'enregistrement contenant ses propriétés hygrothermiques.

6.3.4. Utilisation de la base de données BMW

Le mode d'utilisation du logiciel dépend de la fonctionnalité envisagée.

6.3.4.1. Consultation des propriétés d'un matériau

Ainsi, pour la consultation des propriétés d'un matériau, l'utilisateur est invité à parcourir, à son gré, la structure hiérarchique sous-jacente à la base. Le logiciel propose une succession de menus à choix multiple lui permettant de cerner petit à petit le matériau recherché. A tout moment, il est possible de faire marche arrière si l'utilisateur s'aperçoit qu'il aboutit sur une branche non porteuse par rapport à sa requête. En fin de parcours, le logiciel propose un tableau récapitulatif des propriétés du matériau atteint. La figure 6.8 illustre les différentes étapes d'une consultation pour le matériau "Béton 600-649 kg/m³". La figure 6.9 montre le tableau de propriétés obtenues au terme de la requête.

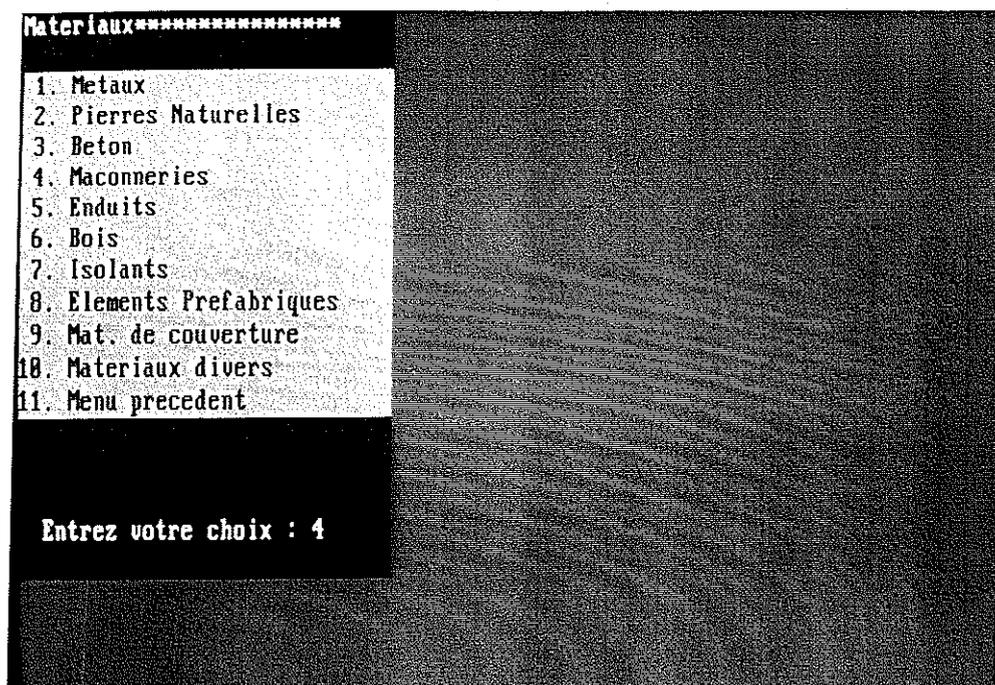


Fig. 6.8 a. Sélection dans le menu de niveau 1

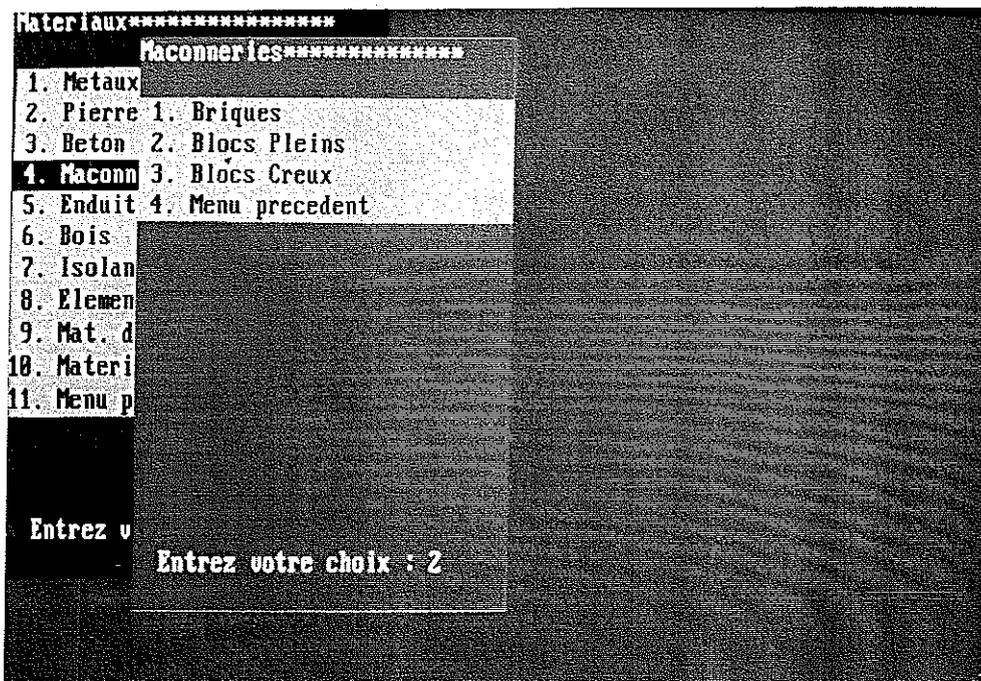


Fig. 6.8 b. Sélection dans le menu de niveau 2

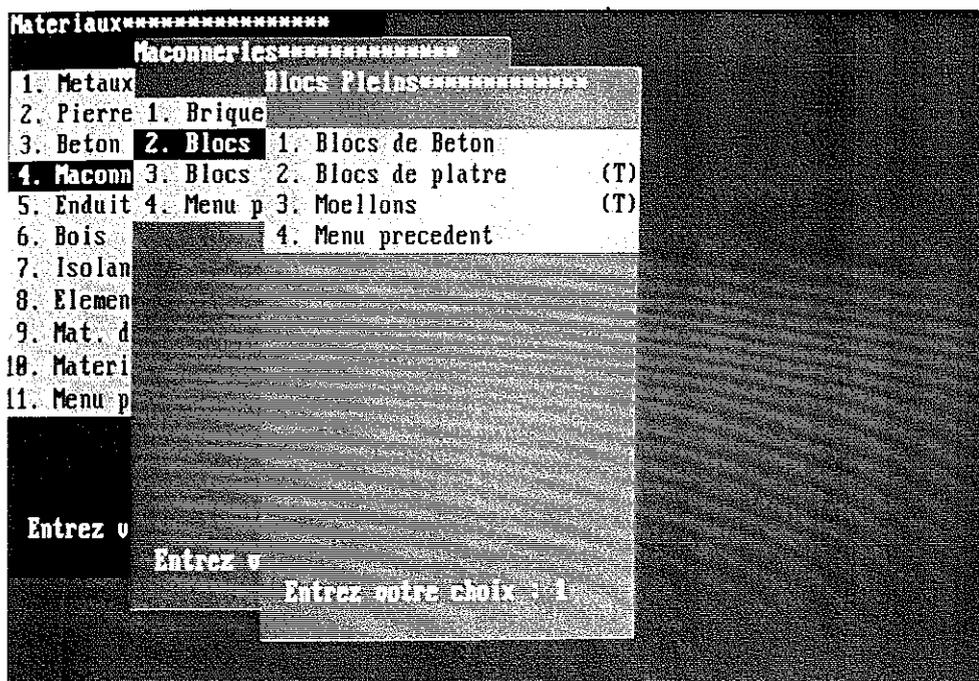


Fig. 6.8 c. Sélection dans le menu de niveau 3

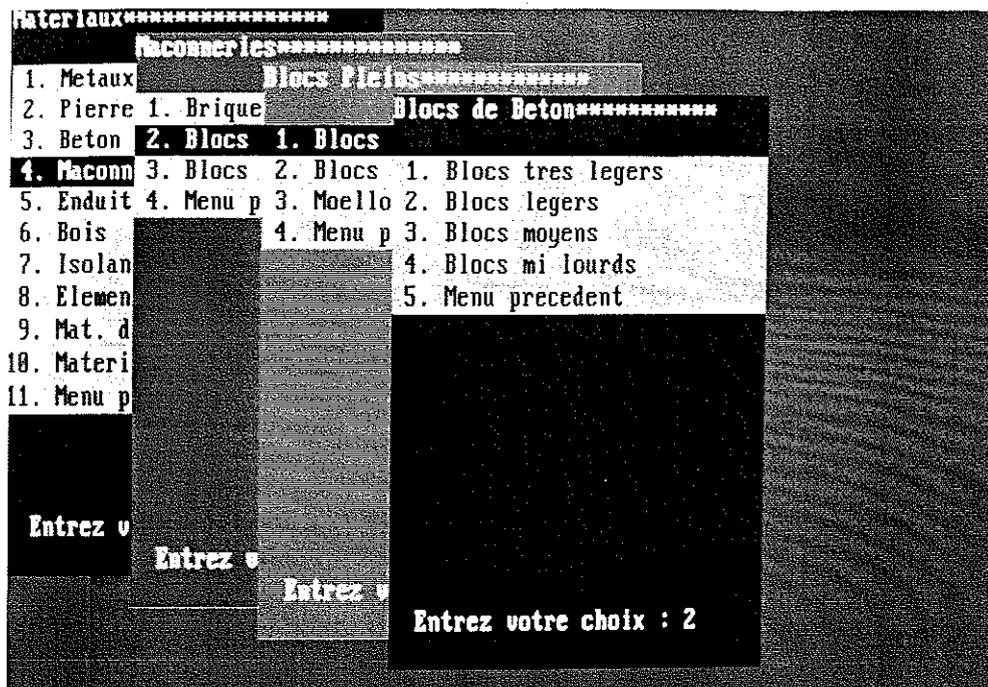


Fig. 6.8 d. Sélection dans le menu de niveau 4

Beton 600-649 kg/m³

Propriétés thermiques :	Propriétés physiques :
Conductivité (sec) : 0.200 W/mK	Masse volumique : 600.0- 649.0kg/m ³
Conductivité (hum) : 0.310 W/mK	Masse surfacique: kg/m ²
Resistance (sec) : 0.000 W/m ² K	Epaisseur : m
Resistance (hum) : W/m ² K	
Capacité (sec) : 840.000 J/kgK	Propriétés hygriques :
Capacité (hum) : 0.000 J/kgK	Res. a la diffusion (sec) :
Propriétés solaires :	Res. a la diffusion (hum) :
Absorbance solaire	Propriété radiative :
Transmittance solaire	Emissivité :
Reflectance solaire	

Press any key to continue

Fig. 6.9. Tableau des propriétés du béton 600 - 649 kg/m³

6.3.4.2. Recherche d'un enregistrement à partir de la valeur d'un ou plusieurs de ses champs

Lors de l'utilisation de cette fonctionnalité, l'utilisateur impose la valeur d'un ou de plusieurs attributs. Le logiciel recherche alors, séquentiellement, le(s) enregistrement(s) dont la valeur des champs correspond à celle des attributs spécifiés dans la requête. En guise de réponse, le logiciel fournit alors le nom de(s) matériau(x) satisfaisant aux critères désirés.

6.3.4.3. Calcul du coefficient K

Il s'agit d'un sous-programme de calcul connexe et souvent associé à la consultation d'une base de données "matériaux de construction". Ce sous-programme ne fait pas partie du logiciel de gestion proprement dit mais en utilise une partie des fonctionnalités.

Le coefficient "K" constitue le coefficient de transmission thermique d'une paroi et dépend intimement des propriétés des matériaux constitutifs. Pour son calcul, l'utilisateur se voit proposer une série de questions relatives aux caractéristiques générales de la paroi : extérieure/intérieure, protégée d'humidification ou non, aérée ou pas, nombre de couches. Ensuite, les matériaux constitutifs sont demandés par la procédure de consultation décrite en 6.3.4.1. En fin de parcours, les données correspondant à l'enregistrement sélectionné sont transmises au sous-programme de calcul du coefficient K qui dispose alors de toutes les informations nécessaires pour mener sa tâche à bien. Le logiciel propose alors une fiche récapitulative représentée à la figure 6.10.

RECAPITULATIF DE LA PARI : *****			
Couche	Matériau	Épaisseur cm	Résistance thermique m ² K/W
Résistance superficielle externe			0.00
1	Placa. Pl. Gips > 1200/19cm	-	0.01
2	Laine Minérale	6.8	1.50
Résistance superficielle interne			0.00
Résistance thermique totale de la paroi :			R = 1.51 m ² K/W
Transmission thermique de la paroi :			***** • K = 0.66 W/m ² K • *****
Press any key to continue ...			

Fig. 6.10. Fiche récapitulative du calcul du coefficient K d'une paroi

6.3.5. Problèmes particuliers

La taille réduite de la base de données BMW et le caractère local de son implémentation n'ont pas justifié de porter une attention particulière aux problèmes de fiabilité, protection et intégrité de la base de données.

Pour donner une idée du niveau de complexité du logiciel "BMW", le code-source, développé en Turbo-Pascal (Borland, 1988) a nécessité 1250 lignes de programmation pour fournir un code exécutable occupant 67 K octets en mémoire centrale. L'accent a été mis sur le caractère interactif de l'utilisation du logiciel qui rend la procédure de recherche extrêmement rapide.

6.4. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

La procédure et le logiciel décrits ci-dessus peuvent s'appliquer à tout type de situation pour laquelle la constitution d'une base de données informatisée, même réduite, s'avère susceptible d'apporter une contribution significative à la résolution du problème.

Les différentes étapes de la procédure comprennent la définition du schéma de la base de données, l'élaboration de la structure hiérarchisée éventuelle (elle n'est pas obligatoire) sous-tendant les informations, l'écriture des procédures de calcul et d'affichage des résultats de la requête. A titre d'exemple, le même logiciel a été utilisé afin de fournir une information relative aux coordonnées géographiques d'une série de villes (latitude, longitude, altitude). Dans cet exemple, aucune structure hiérarchique n'est implémentée à ce jour, mais il pourrait s'opérer une classification des villes d'après le pays, la région, la province à laquelle ils appartiennent.

Le même potentiel d'application universel est évidemment offert par les "grands" logiciels de gestion de base de données actuellement disponibles : DBASE, ORACLE, INFORMIX, ... Ces logiciels possèdent en outre des fonctionnalités particulières leur permettant une gamme importante de manipulations, débordant de ce fait largement du cadre des fonctionnalités décrites en 6.3.4. La tendance actuelle des SGBD les pousse à évoluer vers une approche "orientée objet", ce qui augmente encore leurs potentialités (Dittrich, 1989a), (Dittrich, 1989b). Des considérations relatives à cet aspect du problème seront émises au chapitre 9.

Dans le domaine environnemental, la technologie informatique des bases de données s'impose comme un outil essentiel devant la quantité, parfois astronomique, des données constituant l'essence d'un problème. Il importe dès lors de disposer de mécanismes efficaces

Del quel

de stockage, de manipulation et de recherche de l'information. Les bases de données environnementales présentent, de surcroît, deux caractéristiques intrinsèques extrêmement importantes : leur aspect évolutif et leur nature pluri-disciplinaire. Qu'il s'agisse de données relatives à la qualité des eaux ou de l'air en un site donné ou de statistiques propres aux pratiques culturelles d'une région, les informations sont susceptibles de changer à tout instant, ce qui entraîne la nécessité de disposer de mécanismes de mise à jour efficaces. Dans ce contexte dynamique, les problèmes particuliers de fiabilité, de protection et d'intégrité peuvent devenir cruciaux. Par ailleurs, les problèmes environnementaux donnent lieu à la participation et à la manipulation de données en provenance de sources extrêmement diverses: mesures, statistiques économiques, textes légaux, catalogues,... Cette diversité de données se répercute évidemment sur le format utilisé pour les représenter. Il en résulte la nécessité de disposer de systèmes de gestion extrêmement élaborés, aptes à prendre en compte cette diversité de représentation. Dans ce cadre, l'évolution des SGBD vers l'approche "orientée-objet" et l'intégration des SGBD dans des systèmes plus généraux (les logiciels intégrés) constituent autant d'avancées permettant de rencontrer les spécificités des problèmes d'environnement.

A titre d'exemple, une opération menée en Région Wallonne a pour objectif le suivi de la qualité des eaux de source exprimée par leur teneur en nitrates (NO_3^-) et le stockage des informations dans une base de données. Ici aussi, le modèle des données retenu appartient à la catégorie "entités-relations" et son schéma découpe un enregistrement en 11 champs

- la commune de prélèvement : chaîne de caractères
- le code "ORI" : entier
- le sous-type du prélèvement : chaîne de caractères
- le nom du site : chaîne de caractères
- la coordonnée x : réel
- la coordonnée y : réel
- le code NO_3^- : entier
- le code IHE : entier
- l'analyse IHG : réel
- le code FUL : entier
- l'analyse FUL : réel

A l'heure actuelle, cette base de données est appelée à être intégrée dans un Système d'Information Géographique afin de subir un traitement approfondi.

6.5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre a tenté de mettre en évidence la nécessité de disposer d'outils spécifiquement adapté afin d'assurer le stockage, la manipulation et la recherche de données relatives aux problèmes d'environnement. Pour ce faire, la problématique a d'abord été située dans le contexte théorique rigoureux des bases de données. Successivement, l'organisation conceptuelle, le schéma, l'implémentation et les modalités d'utilisation d'une base de données ont été abordés. Quelques problèmes particuliers essentiellement liés à la fiabilité et à la sécurité des systèmes de gestion ont été effleurés.

L'ensemble de la démarche de développement et d'utilisation d'une base de données a été illustré sur un problème simple, d'envergure très limitée, mais qui permet néanmoins de parcourir toutes les étapes du problème : la construction et la manipulation d'une base de données relatives aux propriétés hygrothermiques des matériaux de construction. La base de données s'accompagne d'un logiciel de gestion apte à aider l'utilisateur pour exprimer et mettre en oeuvre ses requêtes.

La généralisation à d'autres problèmes d'environnement s'impose tout naturellement dans la mesure où ce type de situation génère et véhicule le plus souvent des quantités très importantes de données qui présentent, de plus, un caractère dynamique, évolutif et pluri-disciplinaire imposant le recours à des outils capables de les prendre en compte. A ce titre, la recherche de la qualité et de la fiabilité de l'outil informatique s'affirme comme une condition essentielle au traitement efficace des problèmes environnementaux.

CHAPITRE 7.

SYSTÈMES

EXPERTS

7.1. INTRODUCTION

De toutes les disciplines ou "technologies" informatiques engendrées par le développement de l'outil, l'Intelligence Artificielle est sans conteste, celle qui a suscité, dès ses premiers balbutiements, le plus d'espérances et de promesses. La formulation du terme "Intelligence Artificielle" en lui-même suscite déjà le rêve et les espoirs les plus élevés : l'ordinateur va tout résoudre, tout simuler, tout remplacer, y compris la richesse et la complexité du raisonnement humain.

L'évolution enregistrée au cours de ces 20 dernières années a largement tempéré ces attentes. Les limites et les difficultés issues de l'application des techniques de l'Intelligence Artificielle sont apparues au grand jour et ont contraint les chercheurs obstinés à redéfinir de manière plus circonscrite les problèmes qu'ils lui adressent. Ainsi, en est-on revenu à des problèmes d'envergure plus modeste, mieux cernés dans des limites plus raisonnables.

Une des préoccupations majeures des techniques actuelles de l'Intelligence Artificielle consiste peut-être à définir les conditions dans lesquelles ce type de technologie informatique s'affirme comme supérieure aux méthodes classiques essentiellement basées sur une programmation algorithmique ou procédurale. Le travail proposé dans cette thèse s'inscrit exactement dans cette problématique. Dans le contexte d'un problème environnemental à résoudre, quelles sont les tâches à assigner à un outil informatique basé sur ce genre de techniques? Dans quelles circonstances ces méthodes prennent-elles le pas sur d'autres types d'approches logicielles?

Pour répondre à ces interrogations, nous ferons, comme dans les autres chapitres, le "détour" par le domaine de la physique du bâtiment en examinant le contenu de différentes contributions de l'Intelligence Artificielle et plus particulièrement des Systèmes Experts à cette discipline. Dans cette perspective, il sera fait état d'un système d'informations pour architectes (ISOLDE), d'un système expert pour l'aide à la modélisation de processus thermophysiques dans le bâtiment (MIS), d'un logiciel de contrôle du système de chauffage des bâtiments solaires (HEATING-EXPERT). Ensuite, nous montrerons comment ces différentes approches peuvent s'appliquer au domaine environnemental et nous tenterons de définir les critères du choix d'une telle méthode et les avantages que cette démarche présente par rapport aux logiciels plus classiques, notamment dans les problèmes d'expertise qui ne manquent pas de surgir au vu des contraintes imposées de façon de plus en plus sévère pour le respect des normes.

7.2. RAPPELS DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES EXPERTS (Domange et al, 1989)

7.2.1. Introduction

Fondamentalement, un système expert apparaît comme un logiciel composé de deux parties bien distinctes : un support de l'expertise ou "base des connaissances" renfermant, sous une certaine forme, les règles qui vont conduire à la réalisation d'une procédure d'expertise et un mécanisme de réflexion ou "moteur d'inférence" capable de manipuler et de traiter l'information contenue dans la base des connaissances. Cette dichotomie brusque entraîne la totale indépendance du moteur d'inférence par rapport au problème traité : toute la spécificité en repose sur la base des connaissances, à l'opposé des programmes procéduraux classiques dans lesquels données et mécanismes de traitement apparaissent intimement imbriqués.

La figure 7.1 représente l'architecture de base d'un système expert de la 1^{ère} génération qui met en évidence les différentes composantes d'un tel système :

- la base des connaissances
- le moteur d'inférence
- le mécanisme d'acquisition de la connaissance
- le mécanisme d'explication du raisonnement
- l'interface-utilisateurs

Les champs d'application préférentiels de tels systèmes couvrent les domaines où l'expertise humaine existe mais demeure rare, des problèmes complexes à haute valeur économique, caractérisés par la nature essentiellement déductive de leurs solutions et l'absence d'une solution algorithmique pratique.

Une classification sommaire des applications des systèmes experts distingue les problèmes de conception (design) des problèmes de diagnostic (contrôle) qui correspondent à deux stratégies de contrôle diamétralement opposées. Dans le premier cas, le système part d'un contexte (un ensemble de "faits" qui lui sont connus) pour proposer une solution. On parle alors de moteur d'inférence fonctionnant en chaînage "avant" ("forward chaining"); dans le second cas, le système part d'un but à atteindre et détermine si le contexte actuel (l'ensemble des faits connus au moment de l'inférence) est compatible avec ce but. Il s'agit dans ce cas d'une stratégie de chaînage "arrière" ("backward chaining").

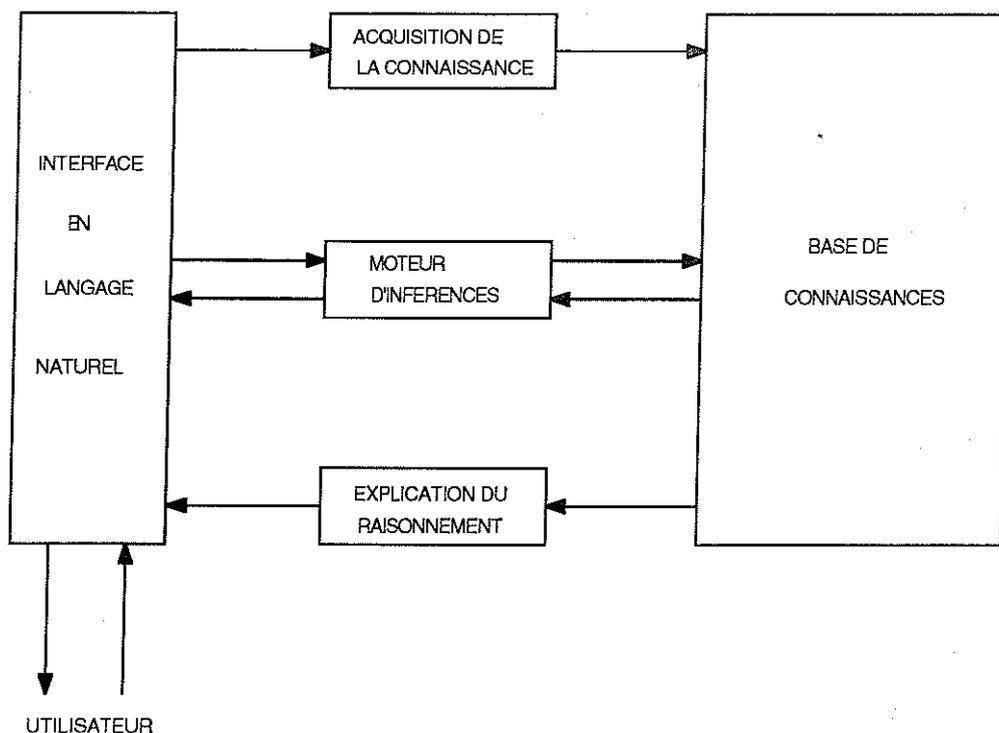


Fig. 7.1. Architecture d'un système expert de la 1^{ère} génération

7.2.2. Moteur d'inférence et base de connaissances

La dichotomie évoquée ci-dessus engendre aussi une double évolution des systèmes experts à partir de l'architecture présentée à la figure 7.1. D'une part, les moteurs d'inférence voient leur structure de contrôle progressivement muter des techniques de recherches dans des graphes d'états vers une manipulation explicite et organisée de connaissances. D'autre part les bases de connaissances, originellement constituées d'un ensemble "plat" (sans structure) de règles de production font de plus en plus appel à des techniques sophistiquées de représentation de la connaissance basée, soit sur l'utilisation de formalismes logiques, soit sur des structures plus évoluées : les objets, les classes, les cadres, les "frames". Les systèmes experts rejoignent alors le monde de la "programmation orientée objets" (POO) dont il sera de nouveau abondamment question au chapitre 9. Les systèmes les plus sophistiqués utilisent d'ailleurs les acquis des deux tendances à cause de la complémentarité qui existe entre les approches (Grégoire, 1986) : les formalismes logiques et les règles de production prévalent par leur mise en oeuvre de l'implication logique et leur potentiel

assertionnel mais pèchent par leur manque de possibilité intrinsèque de structuration de la connaissance; les formalismes à base de modèles (langages orientés objet, frames, cadres) présentent l'avantage de fournir un cadre de structuration de la connaissance mais manquent de rigueur et de mécanismes éprouvés de manipulation de la connaissance ainsi codée. Par conséquent, la meilleure solution réside dans une coexistence des divers formalismes au sein de la base de connaissances.

7.2.3. Méthodologie du développement des systèmes experts

La première question à se poser lors de la mise en chantier d'un système expert concerne la justification de l'approche pour le problème adressé. D'une manière générale, le développement d'un système expert apparaît fondé lorsque l'une des conditions suivantes est remplie :

- la tâche à remplir est "rentable", si l'on se limite à une vision économique des choses,
- l'expertise à retenir risque d'être perdue en cas de non-développement du système,
- l'expertise adressée par le système peut être considérée comme rare,
- l'expertise procurée par le système apparaît nécessaire pour de nombreux utilisateurs,
- l'expertise contenue dans le système est requise dans un environnement hostile.

Dans l'une ou l'autre de ces situations, le développement d'un système expert pourra voir le jour pour autant que les contraintes suivantes soient satisfaites :

- la tâche à accomplir ne requiert pas de capacités de bon sens,
- la tâche demande uniquement une certaine habilité cognitive
- les "experts" peuvent expliquer leurs méthodes de travail
- les "experts" véritables existent
- les "experts" apparaissent d'accord sur une solution
- la tâche à accomplir n'est pas trop difficile
- la tâche à accomplir est suffisamment comprise

Par ailleurs, d'autres circonstances vont renforcer le caractère justifié d'un système expert :

- la tâche requiert une manipulation symbolique
- la tâche requiert des solutions heuristiques
- la tâche apparaît suffisamment complexe
- la tâche possède une certaine valeur pratique
- la tâche possède une taille "gérable"

En raisonnant par l'absurde, les systèmes experts sont inaptes à travailler dans l'une des conditions suivantes :

- représentation d'une connaissance temporelle
- représentation d'une connaissance spatiale
- utilisation d'un raisonnement basé sur le "bon-sens"
- détection des limites de leurs aptitudes
- traitement d'une connaissance inconsistante.

Ces contraintes et limitations étant connues, les systèmes experts peuvent néanmoins s'appliquer dans de nombreux types de problèmes qu'il est possible de classer suivant la liste suivante :

Interprétation : inférer une situation à partir des données mesurées

Prédiction : inférer les conséquences vraisemblables d'une situation donnée

Diagnostic : inférer le mal fonctionnement d'un système à partir d'observations

Conception : configurer des objets sous contraintes

Planification : prévoir des actions

Monitoring : comparer des observations à des prévisions

Détection de fautes : prescrire des remèdes en cas de mal fonctionnement

Réparation : exécuter un plan pour administrer des remèdes prescrits

Instruction : diagnostiquer et améliorer le comportement des étudiants

Contrôle : gouverner le fonctionnement global d'un système.

Ces considérations ont donné lieu, au fil du temps, à l'émergence de trois méthodologies de développement, correspondant à autant de générations de systèmes experts :

- l'approche superficielle ("Shallow-knowledge approach")
- l'approche par modélisation du contexte du problème
- l'approche par organisation et structuration du problème ("Deep-model approach") et de sa stratégie de résolution ("Structured-reasoning approach").

7.2.4. Implémentation des systèmes experts

Pour procéder à l'implémentation d'un système expert, il est possible de travailler à 4 niveaux logiciels différents :

- soit l'utilisation d'un langage de programmation classique tel que "Pascal"
- soit l'utilisation d'un langage de programmation spécifique tel que "Prolog" ou "Lisp"

- soit l'utilisation d'un noyau ("shell") de système expert qui peut être assimilé à un système expert vidé de toute sa connaissance (Nexpert, Level V, ...)
- soit l'utilisation d'un environnement de développement complet incluant une boîte à outils ("KEE", "Knowledge Craft").

Ces différentes approches se caractérisent par une complexité et un confort d'utilisation croissants, au détriment de la flexibilité et de la souplesse qui apparaissent maximales lorsque l'utilisateur développe lui-même l'entièreté du logiciel.

7.3. DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES EXPERTS EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT

7.3.1. INTRODUCTION

Dans le domaine de la physique du bâtiment, différents systèmes experts ont vu le jour, spécialisés dans des secteurs aussi différents que l'information en vue de l'aide à la conception, la classification et la documentation de modèles et de programmes, le contrôle en temps réel. Ce paragraphe a pour objet de montrer, dans cette panoplie d'applications, le caractère extrêmement flexible de ce type d'approche. Si nous avons participé d'assez près aux deux premiers développements (alimentation de la connaissance de ISOLDE, alimentation, structuration et utilisation de la connaissance dans MIS), nous tenons toutefois à signaler que le développement de HEATING EXPERT a été entièrement l'apanage de notre collègue, J. Nicolas. Ce système est mentionné ici afin de montrer une facette supplémentaire de l'utilisation des systèmes experts.

Comme signalé en 7.2.3, les systèmes experts constituent un outil informatique particulièrement bien adapté aux exigences de la conception (design) dans la mesure où il s'agit typiquement d'une démarche de "chaînage avant" faisant appel à des ressources cognitives accompagnées de nombreuses considérations heuristiques. Il n'est dès lors pas étonnant de voir un grand nombre de systèmes en cours de développement, même en se restreignant au domaine de la conception de bâtiments. Certains de ces projets ont déjà été mentionnés en 1.5.2. Mentionnons seulement à titre de rappel ou d'exemple, les travaux de l'école australienne (Rosenman et Gero, 1985), (Rosenman et al, 1986), (Rosenman, 1990). Carrara et Novembri (1990) proposent une réflexion plus méthodologique alors que des applications plus spécifiquement dédiées à la conception des systèmes de chauffage apparaissent dans Doheny et Monaghan (1987) et Cordier et Cousin (1989). Enfin, la problématique du respect des normes apparait traitée par Evans (1990).

7.3.2. ISOLDE, un outil d'aide à la conception solaire de bâtiments

Dans le cadre du projet IEA XI (voir 1.2.1.1), un système expert a été mis en chantier dans le souci de disposer d'un support informatisé pour la présentation des résultats du projet qui constitue une alternative au "Source Book" (IEA Task XI, 1993). Le sous-projet "Système expert" était coordonné par une équipe danoise (Cenergia Energy Consultants) et a reçu un très important input de la part de la Norvège (SINTEF). Pour se référer à la terminologie en vigueur dans le domaine, SINTEF a procédé au développement du système autour d'un noyau (shell) tandis que les autres participants au projet IEA XI ont alimenté la base de connaissances à partir de déductions issues de l'expérience et de la simulation.

Le système "ISOLDE" (Integrated knowledge Based SOLar DEsign tool) constitue principalement un système d'information énergétique pour le design des atriums (espaces vitrés de grande dimension, de plus en plus utilisés à des fins énergétiques, surtout dans les pays nordiques). Sa structure (Bryn, 1990) inclut 3 sous-systèmes : avis général, analyse de cas orienté et simulation. La philosophie générale du système est de suggérer plus que d'imposer des solutions au concepteur qui demeure le seul interlocuteur en matière de décision. La figure 7.2 représente la structure et les fonctionnalités du système.

Le sous-système "Avis général" ("General advice") contient une évaluation, à partir d'une base de règles, de différentes typologies de bâtiments et de systèmes solaires. Son objectif consiste à suggérer des stratégies énergétiques convenables en fonction du climat, de l'utilisation et de la typologie du bâtiment. Cette partie du système est reliée à un système informatisé de présentation d'images video de différents projets existant.

Le sous-système "Analyse de cas orienté" ("Case Oriented Analysis") entreprend une première évaluation chiffrée du projet en utilisant des méthodes simplifiées de calcul qui ne requièrent qu'un nombre limité de données. Son objectif consiste à fournir une première évaluation du projet qui permettra, soit de poursuivre l'étude si les résultats apparaissent satisfaisants, soit de remettre en cause certains choix fondamentaux si de graves lacunes sont constatées.

Le sous-système "Simulation" (Simulation) réalise alors une évaluation plus approfondie du projet en utilisant un logiciel de simulation numérique tel que ceux décrits en 5.2.2.2. Sa fonction est de fournir des réponses précises à des questions de détail qui permettent d'affiner le projet et de faire les choix qui s'imposent afin d'en optimiser les performances.

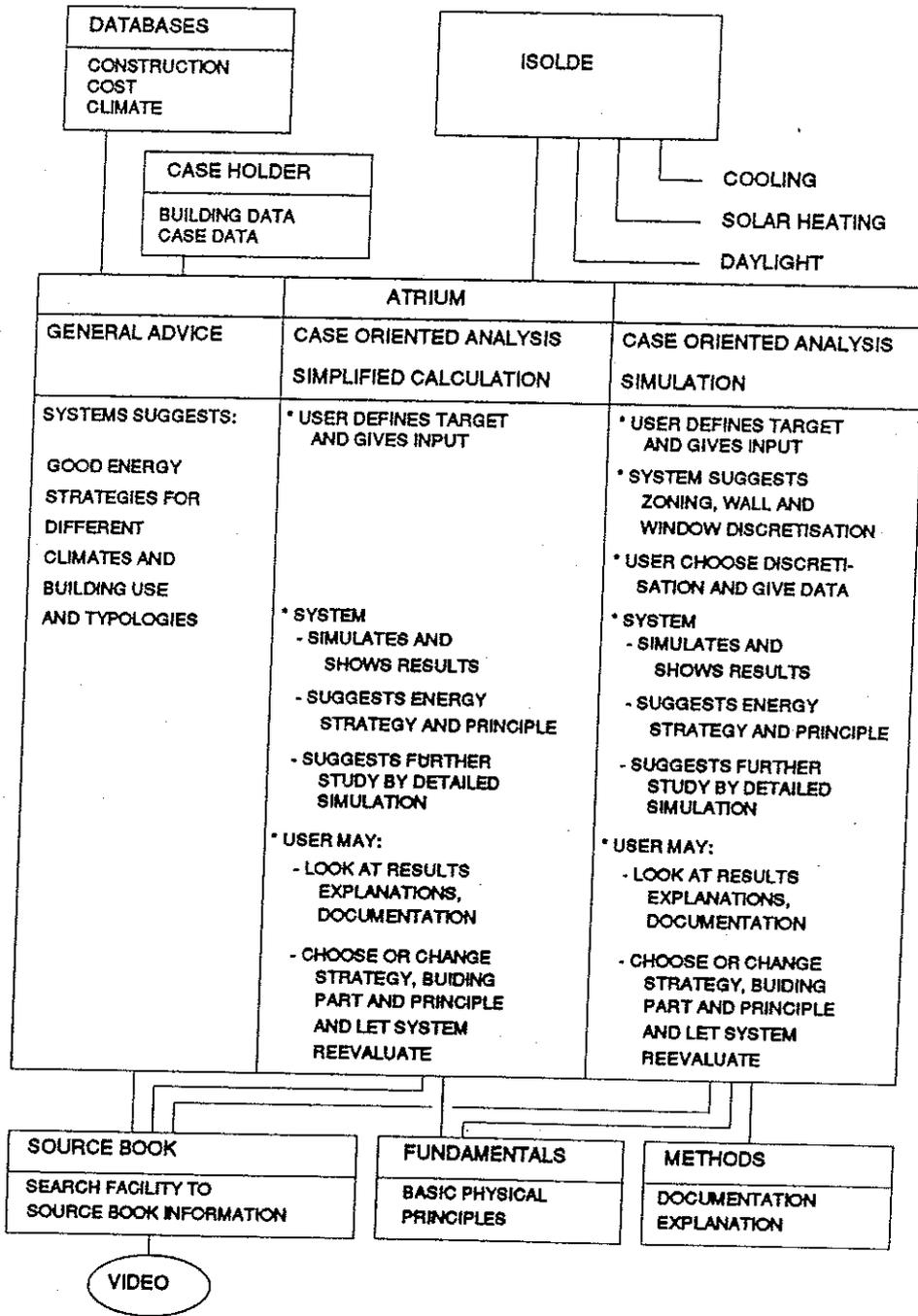


Fig. 7.2. Structure et fonctionnalités du système "ISOLDE"
Extrait de Bryn (1990)

Ces 3 modules sont couplés à des bases de données relatives aux éléments de construction, aux coûts et aux données climatiques ainsi qu'à une "mémoire" permettant de conserver et comparer différentes versions d'un même projet.

Initialement conçu pour la conception des atriums, ISOLDE s'est étendu afin d'incorporer les résultats obtenus par les autres groupes de travail du projet IEA XI : chauffage (heating), refroidissement (cooling) et éclairage naturel (daylighting). Pour ces trois domaines d'application, le même découpage du système prévaut (Morck et al, 1991).

7.3.3. MIS, un outil d'aide à la classification et à la documentation de modèles mathématiques en physique du bâtiment

Dans le cadre du projet IEA ANNEX XXI (voir 1.2.1.2), la sous-tâche "A" ("Documentation of existing methods") poursuivait comme objectif la mise au point d'une méthodologie de documentation de modèles et de programmes utilisés dans le contexte de la physique du bâtiment et l'application de cette méthodologie pour la documentation d'exemples concrets. A la suite de quelques approches infructueuses (concernant, entre autres l'utilisation de la technique, d'origine française, des "proformas", mentionnée au chapitre 5), le choix s'est porté sur le développement et l'utilisation d'un système expert, MIS ("Management of Information System") (Bloomfield, 1992).

Comme tout système expert, MIS est constitué d'un moteur d'inférence, d'un système d'acquisition de la connaissance, d'une interface utilisateur et de la base de connaissances proprement dite. Le développement des 3 premiers modules a été réalisé par une équipe chinoise (Tsinghua University, Pékin) travaillant pour le compte du Building Research Institute britannique alors que les autres participants au projet IEA ANNEX 21 prenaient en charge le développement des bases de connaissances. De façon globale, MIS apparaît comme formé de la juxtaposition des différentes bases de connaissances ("librairies" en jargon MIS), d'un module de développement des librairies ("RUN"), d'un module de documentation ("DOCUMENT") et d'un module d'analyse ("ANALYSIS"), entourés d'une interface utilisateur. Les 3 modules "périphériques" utilisent le moteur d'inférences constitué dans ce cas par un compilateur "Prolog". La figure 7.3 représente la structure complète du système.

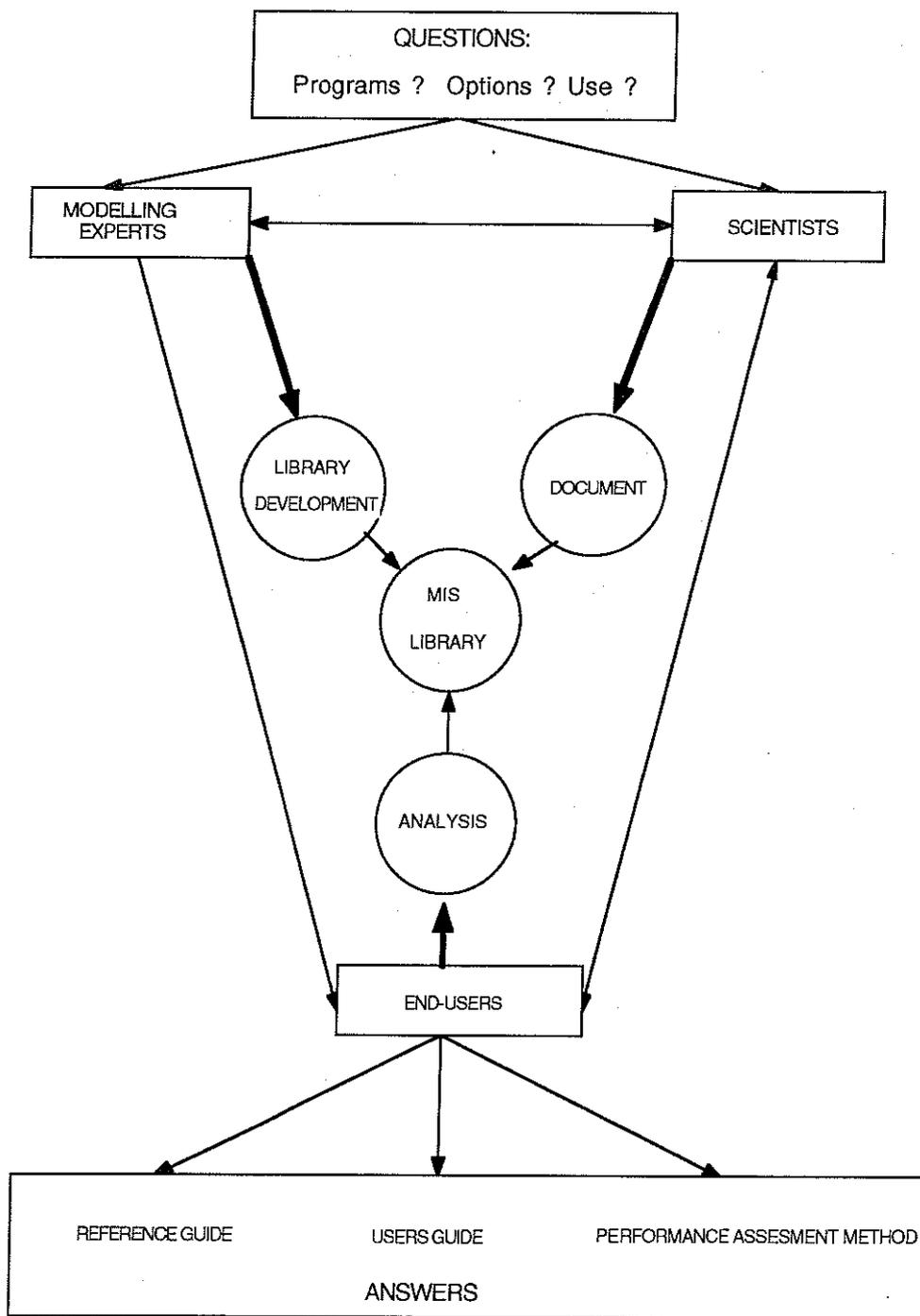


Fig. 7.3. Structure du système expert de documentation MIS

En vue de réaliser le développement des bibliothèques et devant l'ampleur de la tâche, le travail a été réparti entre les différents participants en fonction d'une classification préliminaire des phénomènes physiques intervenant dans le domaine de l'énergétique du bâtiment :

- environnement extérieur : FUL (Belgique)
- distribution du rayonnement solaire : BRE (Grande-Bretagne)
- mécanisme de transfert de surface : Tsinghua (Chine)
- conduction : Tsinghua (Chine)
- mouvements d'air : TNO (Pays-Bas)
- gaines internes : Politecnico di Torino (Italie)
- systèmes HVAC : ULg (Belgique)
- environnement intérieur : FUL (Belgique)
- contrôle : ULg- FUL(Belgique)

Pour chacun de ces domaines, la réflexion a été poussée plus loin en vue de proposer une représentation structurée de la connaissance actuellement disponible. Afin d'aider à la formalisation de cette connaissance, une réflexion méthodologique a eu lieu, d'abord centralisée sur les modèles solaires passifs (André, 1991 a) puis étendue à tous types de modèles de bâtiments (André, 1991 c). Cette méthodologie établit le chemin à suivre entre le système à modéliser et le modèle du système et apparaît sous-jacente à la mise au point de toute bibliothèque du système MIS. Elle est schématiquement représentée à la figure 7.4.

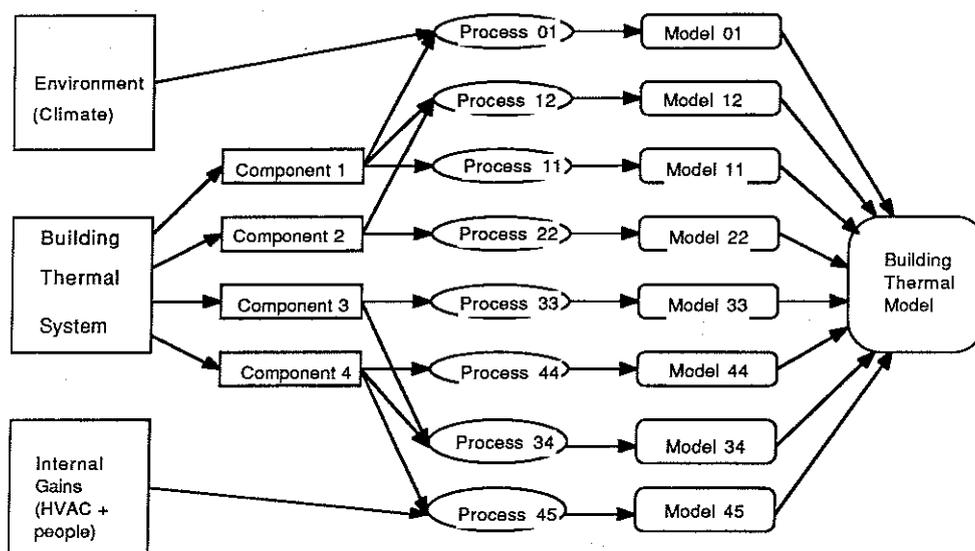


Fig. 7.4. Méthodologie de classification de modèles en physique du bâtiment

L'implémentation des concepts issus de la réflexion méthodologique préalable a eu lieu en utilisant la double structure de la connaissance sous-jacente aux bibliothèques de MIS : la structure en groupes qui organise les différents fragments de la connaissance en "chapitres" et "sous-chapitres" et la structure en arbre qui définit les liens hiérarchiques existant entre les différentes parties de la connaissance (André et al, 1992). Au terme de l'implémentation, le logiciel, armé de toutes ses bases de connaissance, apparaît alors à même de produire une documentation informatisée, compacte, standardisée, donc comparable, pour tous les logiciels disponibles sur le marché, entre autres ceux décrits en 5.2.2.2. A titre d'exemple, la démarche globale a été appliquée au logiciel belge MBDSA et a produit un manuel de référence informatisé ("Reference guide") du produit (André, 1992 c). D'autres applications potentielles de MIS envisagent (Bloomfield et Jiang, 1990) dans le futur:

- la sélection d'un programme pour une application donnée
- les spécifications d'un nouveau programme devant répondre à certaines fonctionnalités
- la comparaison des aptitudes de différents programmes.

Ces perspectives font l'objet de la prolongation actuelle du projet IEA Annex XXI, à laquelle la Belgique ne participe pas.

7.3.4. HEATING EXPERT, un logiciel de contrôle en temps réel des bâtiments solaires

Dans le cadre d'un projet de recherches interne à la FUL, un logiciel de contrôle du système de chauffage (complexe) des bâtiments solaires de la FUL a été développé en utilisant la technologie des systèmes experts (Nicolas, 1991).

La justification de cette approche réside dans le caractère extrêmement complexe de l'installation de chauffage à la FUL qui associe collecteurs solaires, stockage intersaisonnier, pompes à chaleur, chaudière et circuits de distribution. Ce système était contrôlé "classiquement" par un programme séquentiel écrit en PL 1, ce qui entraînait une certaine lourdeur dans la maintenance et les inévitables modifications à y opérer. Une approche "système expert" permettait de pallier à ces inconvénients en donnant en outre la possibilité de résoudre plusieurs problèmes compétitifs, d'inclure les aspects d'incertitude, d'heuristiques et de subjectivité dans le mécanisme de gestion et de libérer l'opérateur de la structure informatique sous-jacente.

Pour le développement du logiciel, le choix s'est porté sur le langage "Prolog" qui constitue en soi un moteur d'inférence bien adapté aux caractéristiques du problème à résoudre : logique du 1^{er} ordre, parcours de graphes, "backtracking", description du système à contrôler dans les

variables du logiciel. La structure sélectionnée montre une superposition de 3 couches (fig. 7.5)

- un noyau central d'informatique pure qui contient le moteur d'inférence et ses utilitaires
- une couche intermédiaire qui inclut les fonctions typiquement utilisées en thermique et des fonctions économiques
- une couche externe réservée à l'utilisateur pour y écrire son application spécifique en langage naturel. C'est la seule partie du logiciel "visible" de l'utilisateur.

Cette structure est complétée d'une "boîte à outils" comprenant un programme de CAO simple permettant de dessiner le schéma de l'installation, un éditeur de messages, un éditeur de règles, un outil de tracés interactif de courbes, un éditeur d'horaires et de jours de congé.

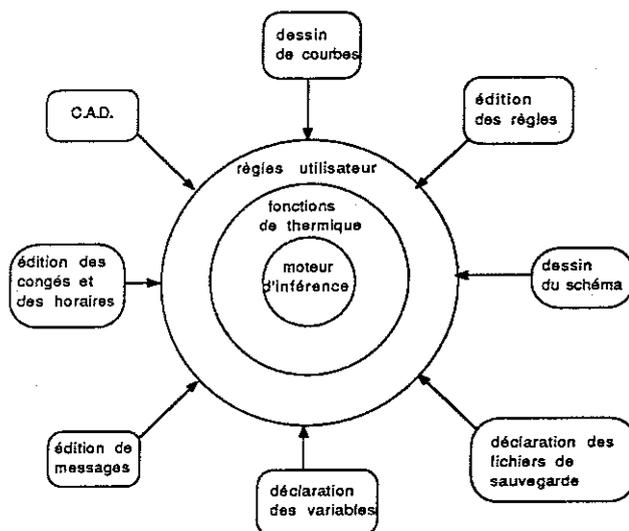


Fig. 7.5. Structure du logiciel de contrôle "Heating-expert" (d'après Nicolas (1991))

Dans l'état actuel du projet, un prototype expérimental existe et plusieurs séries de tests ont été effectuées de façon à mesurer les performances des moteurs d'inférences et à confronter le système à différentes situations, parfois extrêmes (Nicolas et al, 1990), (Nicolas et al, 1991). Ils ont mis en évidence le caractère bien-fondé de l'approche tout en soulignant les contraintes existant lors de l'application d'un système expert pour ce type de problème : gestion du temps, attente d'événements, initialisation des systèmes, actions inverses, interface-utilisateurs. Les limitations de l'outil apparaissent tout aussi clairement : les performances de contrôle restent dépendantes des règles implémentées : le contrôle n'atteint pas ou rarement le caractère optimal et agit plutôt en tant que superviseur de tâches; l'écriture exhaustive de toutes les règles nécessaires peut rapidement devenir fastidieuse.

7.4. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

Les trois applications en physique du bâtiment ont souligné le caractère extrêmement flexible de ce type d'approche et génèrent la perspective de voir les systèmes experts pénétrer le marché des problèmes environnementaux.

En effet, la problématique environnementale possède des nombreuses caractéristiques de nature à rencontrer les objectifs et les spécifications d'un système expert. Tout d'abord, au sens premier du terme, les problèmes d'environnement apparaissent souvent comme des situations où une "expertise" doit être réalisée; cette expertise fait appel à un bagage théorique mais également à des considérations issues de l'expérience (heuristiques). La complexité et les nombreuses incertitudes intrinsèques du problème apparaissent de nature à être prises en charge par un système expert : les règles de la base de connaissances peuvent se voir pondérées de coefficients traduisant le crédit qui leur est accordé; elles sont également capables d'induire la subjectivité propre à l'expert environnemental : deux problèmes, même d'apparence semblable, diffèrent toujours par l'un ou l'autre aspect et cette nuance peut fondamentalement remettre en cause le raisonnement suivi. De plus, le caractère hautement évolutif des problèmes liés au milieu naturel trouve dans le caractère "transparent" des systèmes évolués un avantage qui peut s'avérer déterminant : des non-spécialistes de l'informatique accèdent relativement facilement au caractère interne (les règles) du logiciel, le plus souvent formulées en utilisant un vocabulaire et une syntaxe proches du langage naturel. Enfin, les expertises environnementales apparaissent souvent comme des contrôles de conformité d'une situation donnée à l'égard des standards ou des normes légales, à l'échelle régionale, nationale ou européenne. Les systèmes experts, grâce à leurs mécanismes intrinsèques de parcours de graphes orientés, possèdent les caractéristiques informatiques requises pour aborder et résoudre de tels problèmes. En définitive, la plupart des conditions et contraintes formulées au paragraphe 7.2.3 apparaissent vérifiées dans le contexte environnemental.

Les systèmes experts ne représentent néanmoins aucunement la panacée en matière d'approche informatique des problèmes environnementaux. Comme dans toute gamme de situations, il convient de les mettre en oeuvre et de les utiliser dans les cas où ils présentent des avantages indéniables par rapport aux programmes procéduraux "classiques". Il ne faut en attendre rien de plus que ce que leur base de connaissances est capable d'inférer et il est souvent conseillé de traiter dans une première approche des problèmes d'envergure limitée. La grande flexibilité de l'approche permet néanmoins d'aborder une gamme très large de problèmes, en tenant compte des restrictions émises en 7.2.3.

Ainsi, à titre d'exemple, Stimson (1993) présente l'application d'une telle technologie pour le contrôle "intelligent" de stations d'épuration à boues activées.

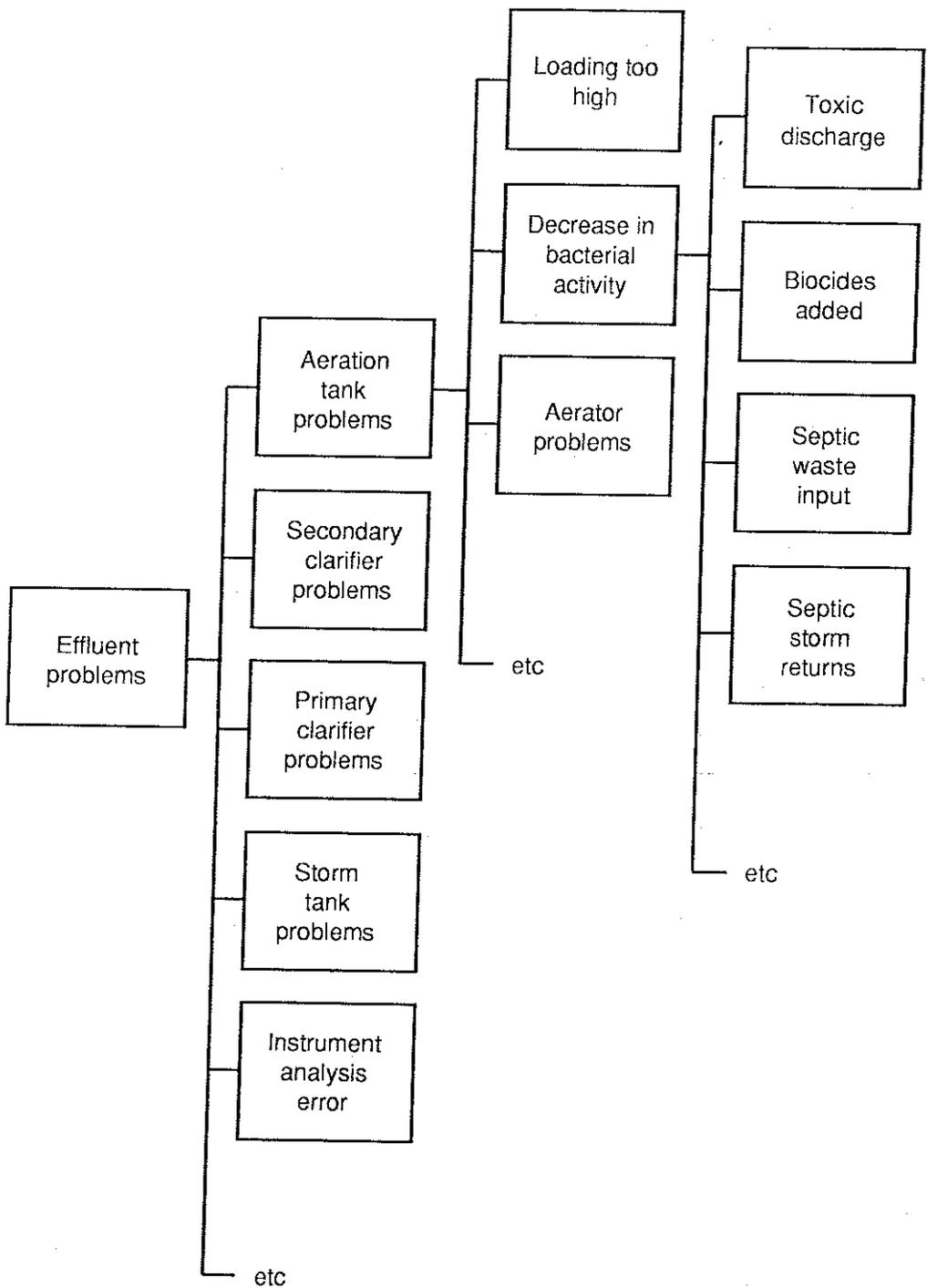


Fig. 7.6. Arbre de décision pour le contrôle d'une station d'épuration

Le système réalise le diagnostic de la station à partir de la détection de problèmes dans les effluents produits en parcourant un arbre de recherche représenté à la figure 7.6. Au terme du diagnostic, des actions destinées à apporter un remède aux problèmes observés sont suggérées par le logiciel en fonction de la cause la plus probable évaluée.

Le système développé se trouve actuellement en phase terminale de test sur différents sites britanniques. Il en résulte des conclusions extrêmement encourageantes relatives à la facilité d'emploi, à l'exactitude et au caractère complet du système de diagnostic. De plus, le système pourra être utilisé comme banc d'essai pour les opérateurs débutants. Les auteurs du projet envisagent d'y adjoindre un modèle mathématique dynamique afin de tester l'efficacité potentielle de stratégies de résolutions alternatives. Des considérations supplémentaires relatives à cette approche seront émises au chapitre 10 (applications).

7.5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre a essentiellement tenté de montrer la potentialité de l'approche "Systèmes experts" pour aborder et résoudre les problèmes qui se posent dans le contexte environnemental. Cette technologie informatique possède de nombreuses particularités qui trouvent une application directe et efficace dans les situations, souvent conflictuelles, émergeant des problèmes d'environnement. La physique du bâtiment a engendré trois exemples d'application ressortant à trois catégories différentes de problèmes : l'aide à la conception, la classification et le contrôle. Les trois catégories d'applications peuvent très bien apparaître également dans la problématique environnementale au même titre que les nombreux problèmes d'expertise qui surgissent de par les contraintes et les exigences actuellement croissantes dans le secteur des normes et des règlements.

Conformément aux implémentations actuellement réussies et opérationnelles des systèmes experts, l'application des systèmes experts aux problèmes d'environnement requiert le respect de certaines conditions : réflexion préalable, formulation structurée de la connaissance, parcimonie, restriction de l'étendue du problème adressé. A ce prix, les systèmes experts pourront générer des applications réellement efficaces et présentant des avantages certains par rapport aux logiciels séquentiels et procéduraux classiques.

CHAPITRE 8.

INFOGRAPHIE

8.1. INTRODUCTION

Dans la majorité des problèmes d'environnement, une représentation graphique informatisée de l'information apparaît comme un élément fondamental de la stratégie de résolution. En effet, un tel problème se trouve toujours localisé à un endroit bien précis, quelle que soit l'échelle du phénomène objet de l'investigation. La construction d'un immeuble, d'un barrage, l'implantation d'une usine, l'apparition d'une pollution marine affecte un site bien particulier de la planète et la prise en main du problème doit obligatoirement débiter par la prise en compte des caractéristiques géographiques, topographiques, géologiques du site, autant d'éléments qui trouvent dans la voie graphique une technique privilégiée de représentation. Par conséquent l'association de l'outil informatique et de techniques de représentation graphique de l'information, association désignée par le vocable "infographie" se doit de figurer dans une approche telle que celle envisagée dans cette thèse.

Il est cependant important de signaler d'emblée qu'aucun développement spécifique dans ce domaine n'a été réalisé dans le cadre de ce travail. L'infographie constitue une branche de l'informatique en pleine expansion dans laquelle des firmes professionnelles de haut niveau technique développent et mettent sur le marché des produits de plus en plus performants et sophistiqués. Il apparaissait dès lors inconcevable, d'une part de tenter de rivaliser avec ces produits, d'autre part de ne pas en tirer parti pour autant que ces outils soient susceptibles d'apporter une contribution significative à la résolution d'un problème environnemental par voie informatisée.

Par conséquent, dans ce chapitre, nous adopterons un profil d'utilisateur en abordant certains produits et en tentant de cerner les caractéristiques qui les rendent particulièrement bien adaptés aux types de problèmes généralement évoqués dans d'autres parties de ce travail. Pour respecter la même logique que dans les chapitres précédents, il sera d'abord fait état d'une catégorie de logiciels graphiques aptes à assister la résolution de problèmes de conception de bâtiments, en l'occurrence les logiciels de Conception Assistée par Ordinateurs. Parmi les nombreux produits disponibles, un exemple sera traité plus en détails, en l'occurrence le logiciel AUTOCAD (Autodesk Ltd) qui apparaît de plus en plus comme un standard dans ce domaine. Ensuite, la généralisation à d'autres problèmes environnementaux s'attachera à décrire une autre catégorie de programmes graphiques, à savoir les logiciels de représentation informatisée du terrain, dans le domaine de la topographie et de la cartographie. Parmi ceux-ci, un exemple précis, le programme ARC/INFO (ESRI, INC) sera abordé plus profondément. Ces deux produits seront en effet réutilisés dans la suite de ce travail (chapitre 9 et 10) afin de répondre à des besoins spécifiques au sein de systèmes intégrés.

8.2. INFOGRAPHIE ET BÂTIMENT : CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

8.2.1. Généralités

L'avènement de l'ordinateur et plus particulièrement de la micro-informatique a donné lieu à la production et à la diffusion de nombreux logiciels de Conception Assistée par Ordinateur. Ces outils, d'abord destinés au secteur de la construction mécanique, ont peu à peu envahi le marché de l'architecture. En effet, la taille réduite requise pour rendre les systèmes opérationnels a pour conséquence la pénétration de la CAO jusque dans les petits bureaux d'architecture, voire les architectes isolés. La CAO est donc devenue d'un usage courant et commun dans le milieu architectural. L'offre de produits est à la hauteur de la demande et des logiciels de plus en plus sophistiqués sont développés et commercialisés. Parmi cette multitude d'outils, un logiciel semble s'imposer comme un standard, surtout dans le "monde" PC : AutoCAD. Ses détracteurs vous diront qu'AutoCAD n'est pas un produit destiné à l'architecture mais un programme de dessin sur ordinateur (DAO). Il est vrai qu'AutoCAD, de par sa structure et son caractère ouvert, embrasse tous les secteurs du dessin informatisé. Il s'agit peut être du logiciel qui, dans le monde, a suscité le plus grand volume de "Third Party Development", à savoir le développement de modules spécialisés, dédiés à des applications spécifiques, par des firmes ou des programmeurs indépendants de Autodesk, le "fabricant" officiel d'AutoCAD. Ce dernier ne demeure pas en reste d'ailleurs puisqu'il propose toute une gamme de produits complémentaires, compatibles AUTOCAD, et destinés à des utilisateurs spécifiques. Parmi ceux-ci, AutoCAD AEC (Architecture Engineering Construction) procure aux architectes et constructeurs, l'outil indispensable qui permet au logiciel de confondre ses réfractaires.

8.2.2. Evolution de la Conception Assistée par ordinateur

La première génération des systèmes de CAO mettaient essentiellement en oeuvre de puissants éditeurs graphiques supportant le dessin d'une collection de primitives graphiques, leur composition en symboles, cellules et couches et la gestion de l'ensemble de cette information graphique comme une entité multi-couches (Eastman, 1991). A partir de là, différentes procédures furent progressivement incorporées pour compléter, modifier ou paramétrer cette information graphique : dimensionnement, cotation, hachurage, listes des quantités, vérification des règles.

Les systèmes destinés à l'architecture ont, de leur côté, apporté des fonctionnalités spécifiques comme des éditeurs de murs, des procédures d'insertion de murs et fenêtres, la paramétrisation de problèmes standards de disposition.

Par ailleurs, parallèlement à la Conception Assistée par Ordinateur, le dessin en 3 dimensions de lignes et perspectives a commencé à être informatisé au début des années soixante. Cette évolution résulte en la mise à disposition d'une gamme de modèles 3 D utilisant les surfaces et/ou les volumes comme entités primitives. Ces modèles procurent en fin de compte une alternative informatique aux maquettes et autres modèles physiques. Ils permettent de représenter de façon inégalée des espaces intérieurs, des finitions de matériaux, des effets de lumière. Un grand inconvénient continue à résider dans le temps de calcul prohibitif qu'ils réclament.

Ces deux évolutions (CAO et modèles 3 D) ont seulement commencé à se rejoindre et cela se concrétise par la mise sur le marché de logiciels de CAO à 3 dimensions ("full - 3 D") à ne pas confondre avec les programmes qui produisent des images à 3 dimensions à partir de l'extrusion d'images 2D. Dans ce dernier cas, on parle plus volontiers de logiciels de CAO à 2,5 dimensions.

Dans le même ordre d'idées, le nombre de logiciels d'application traitant de différents aspects fonctionnels de l'architecture continue d'augmenter : des programmes d'éclairage, de calculs d'énergie, d'acoustique, de planification de site et de paysages, de conceptions intérieures apparaissent sur le marché. Cette abondance de produits divers met en évidence la nécessité d'intégrer différentes représentations d'un même objet au sein d'un logiciel de CAO. La figure 8.1 montre qu'un simple objet, tel une porte, peut conduire à différentes représentations informatisées suivant le point de vue adopté.

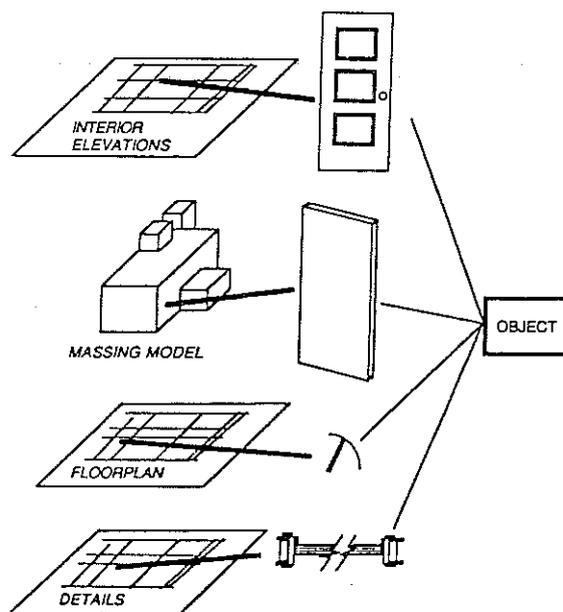


Fig. 8.1. Différentes représentations d'un objet "porte" correspondant à différents points de vue (d'après Eastman (1991))

Afin d'aboutir à un modèle informatisé global, la notion d'objet devient centrale et constitue le point de départ de la nouvelle évolution des logiciels de CAO. Une stratégie alternative consiste à inclure le système de CAO au sein d'un logiciel intégré plus complexe, suivant l'approche qui sera présentée au chapitre suivant. Les systèmes de CAO aptes à répondre à cette évolution du concept de "modèle de bâtiment" devront satisfaire un ensemble de critères dont la liste suivante ne constitue que l'essentiel :

1. Aptitude à générer dynamiquement des plans, des sections, des élévations à partir d'un modèle 3 D et à supporter un grand nombre (≥ 16) de "facettes" d'un même objet.
2. Capacité de supporter des objets définis par l'utilisateur.
3. Capacité d'édition graphique des objets présentés.
4. Adaptation automatique de toutes les facettes d'un objet dès qu'un paramètre change.
5. Contrôle automatique de l'extraction d'attributs permettant la manipulation d'un sous-ensemble de l'ensemble des attributs en fonction de l'usage qui en est fait.
6. Composition aisée de plans, coupes, élévations dans des vues réutilisables et automatiquement adaptées en cas de modifications.
7. Capacité de supporter des objets hiérarchiquement structurés.
8. Capacité de supporter des règles pour la maintenance automatique des descriptions.
9. L'interface-utilisateur doit permettre aux différentes facettes d'un objet d'être générées de façon incrémentale.
10. Capacité de supporter des objets paramétrés, modifiables à partir de variables externes.
11. Capacité de supporter une définition globale des lignes et surfaces afin de caractériser un objet.

Ces contraintes commencent à être satisfaites par les nouveaux produits mis sur le marché. Elles permettront peut-être de poursuivre la pénétration du marché qui approche cependant de la saturation (aux USA en tout cas), ainsi que le montre la figure 8.2.

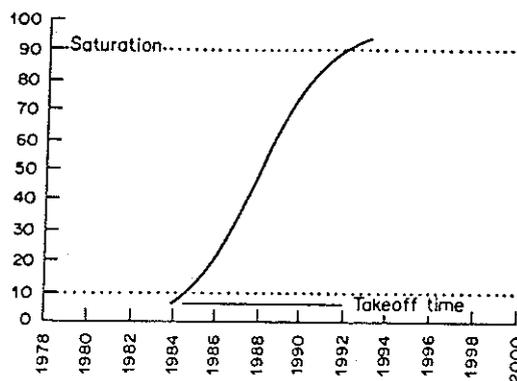


Fig. 8.2. Pénétration de la CAO dans les bureaux d'architecture aux USA (d'après Stevens (1991))

Une autre évolution actuelle des logiciels de CAO tend à les doter de capacités d'expertise (voir chapitre 7) en leur associant une base de connaissances permettant de guider l'utilisateur dans son activité créatrice (Oxman et Oxman, 1991).

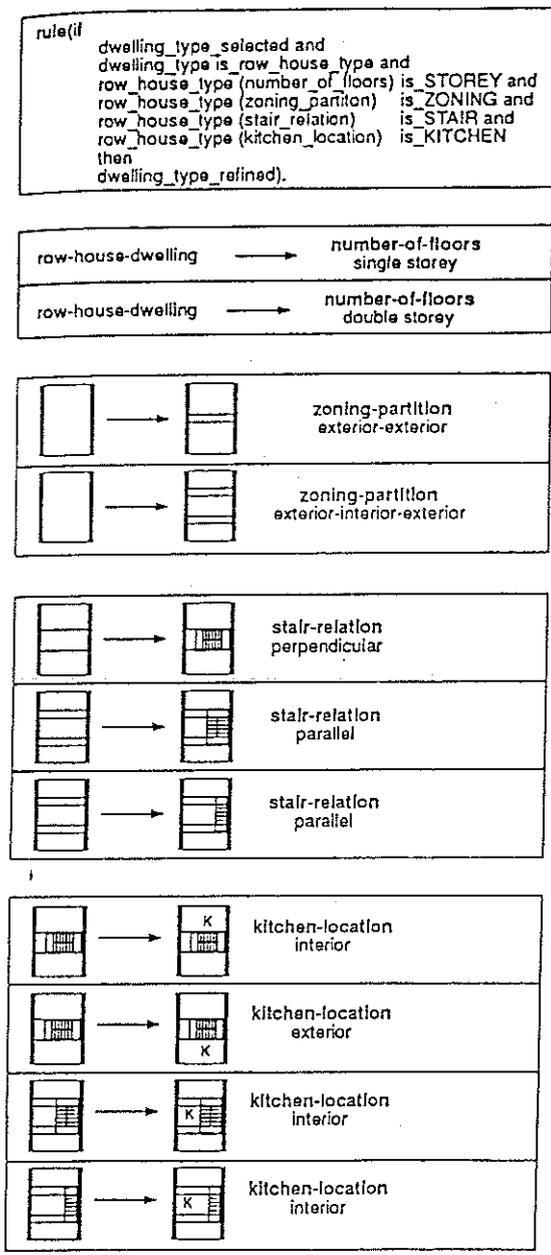


Fig. 8.3. Application de règles génératrices pour un prototype de logement (d'après Oxman et Oxman (1991))

Ceci introduit la notion de "modèle formel" qui permet de réutiliser la connaissance acquise dans des projets intérieurs pour la réalisation de nouveaux projets. Les modèles purement géométriques, par manque de représentation des aspects cognitifs, n'apparaissent pas aptes à offrir toutes les potentialités nécessaires pour aboutir à cet objectif. La figure 8.3 montre comment l'application de règles de conception peut conduire à la génération de différents types d'aménagement intérieur. Cette évolution peut même conduire à considérer les problèmes de conception (design) comme des problèmes de recherche (au sens des systèmes experts) dans des espaces d'état appropriés obtenus par une association sémantique bijective entre le modèle du bâtiment (au sens physique) et sa représentation dans l'espace d'état (figure 8.4). Cet espace est doté d'une syntaxe adéquate permettant une recherche efficace (Woodbury, 1991).

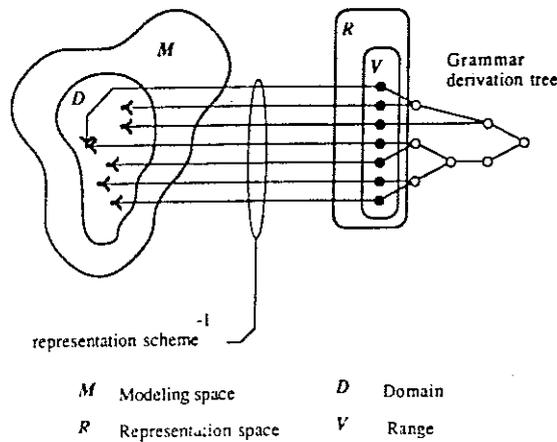


Fig. 8.4. Traduction espace du modèle-espace de représentation basée sur une association sémantique (d'après Woodbury (1991))

8.2.3. Un exemple de système : AutoCAD

AutoCAD est un logiciel que ses concepteurs considèrent comme un outil de "Dessin Assisté par Ordinateur" (DAO). A ce titre, il met l'accent sur le processus de conception sans inclure d'outils d'analyse ou de calcul. Produit par la société "Autodesk Inc.", créée en 1982, AutoCAD est apparu sur le marché en décembre de la même année et a donné lieu depuis lors à 12 versions qui ont chaque fois augmenté les capacités de l'outil. La même société propose une série d'outils complémentaires, entièrement compatibles avec AutoCAD:

- AutoCAD AEC Architecture : Programme de dessin d'architecture en 3D
- AutoCAD AEC Mécanique : Programme de dessin mécanique
- Autosolid : Programme de modélisation volumique
- Autosketch : Programme de base de dessin en 2D
- Autoshade : Programme de création de scènes, avec couleurs et ombrage à partir des dessins "AutoCAD"
- Autoflix : Mise en mouvement des vues créées dans Autoshade
- Animator : Programme d'animation

Outre ces programmes, il existe des centaines d'autres applications réalisées autour d'AutoCAD par des sociétés indépendantes dans des domaines variés: cartographie, chimie, électronique, architecture, urbanisme.

8.3. INFOGRAPHIE ET ENVIRONNEMENT : SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

8.3.1. Généralités

De tous temps, la nécessité de représenter graphiquement la localisation d'une région ou d'un territoire a existé. La géographie s'est d'ailleurs longtemps limitée à établir des cartes permettant une représentation graphique synthétique des entités spatiales. La science de la cartographie s'attachait à cette mission et son évolution a été jalonnée de nombreuses étapes et de "grands noms" que ce travail n'a pas l'ambition ni l'intention de rappeler. L'apparition et la généralisation de l'outil informatique ont toutefois fondamentalement modifié les données du problème en offrant une technologie permettant un établissement et un traitement accélérés et améliorés des cartes géographiques souhaitées. L'informatisation a également gagné les disciplines périphériques de la cartographie, à savoir la topographie, la photogrammétrie, l'analyse d'images à un point tel qu'il est pratiquement possible aujourd'hui de dresser une carte à partir d'une image satellite ou d'un levé topographique, et ce, de façon totalement automatisée.

La puissance de l'outil informatique permet également d'aller beaucoup plus loin que la simple réalisation de cartes. L'association de techniques cartographiques à d'autres ressources informatiques telles que les bases de données (chapitre 6) permet de coupler une information de type graphique (éventuellement sous forme numérique) à une information de type thématique qui traduit les structures à caractère administratif, économique, légal, social ou autre. Nantis de cette capacité d'intégration de données supplémentaires par rapport à la simple description de l'espace, les outils de cartographie deviennent de véritables logiciels de géographie (au sens complet du terme) : les Systèmes d'Information Géographique ("Geographical Information Systems (GIS)"). La figure 8.5 illustre ce concept.

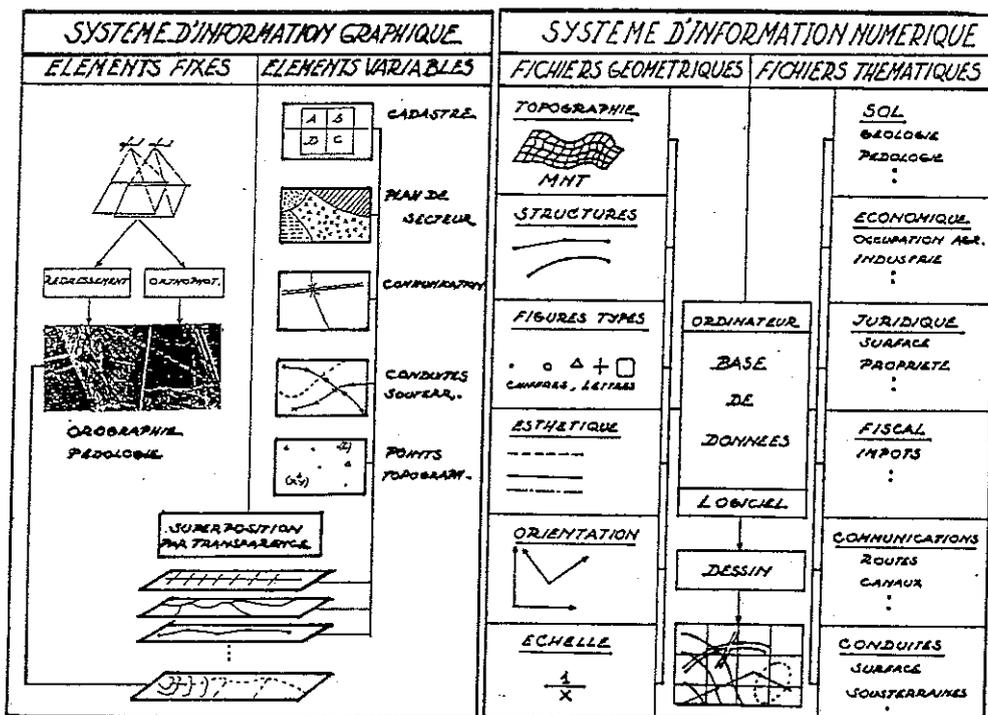


Fig. 8.5. Composantes géométrique et thématique d'un Système d'Information Géographique (d'après Van Twembeke (1989))

Cette technologie trouve une application concrète dans les problèmes environnementaux. Ceux-ci apparaissent en effet toujours liés à un espace et véhiculent une quantité importante d'informations attachée à cet espace. Cette adéquation débouche même sur l'émergence d'une nouvelle forme de cartographie, la cartographie que certains qualifient d'écologique (Van Twembeke, 1989), (Ozenda, 1986). Cette nouvelle cartographie a comme but principal l'intégration de l'information à caractère géométrique et de l'information de nature statistique et écologique se rapportant aux divers facteurs qui dominent la vie de société. Son contenu est orienté vers une meilleure utilisation de la terre, la mise en valeur des ressources naturelles, la conservation de l'environnement et la stimulation du tourisme. La cartographie écologique se présente comme le lien indispensable entre un objet naturel ou artificiel, ou un phénomène écologique et sa localisation sur la surface terrestre et devient un moyen de communication entre les spécialistes et les utilisateurs. Ce nouveau type de document s'appuie sur les principes géométriques de la cartographie "classique" mais en plus nécessite la présence d'une base de données thématique complexe et structurée, la liaison entre les différents thèmes étant assurée par le fond cartographique.

8.3.2. Evolution des Systèmes d'Information Géographique

D'une manière générale, un Système d'Information Géographique constitue un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. Apparus au début des années 80, les premiers Systèmes d'Information Géographique permettaient d'accéder aux informations graphiques, et de visualiser certaines de ces informations sur des cartes.

La figure 8.6 représente la structure générale d'un Système d'Information Géographique. Celui-ci associe, au sein d'un même environnement de travail, des modules graphiques et des modules d'application, couplés à différentes bases de données géométriques et sémantiques (ou thématiques). Les périphériques privilégiés incluent la console graphique, le traceur et la table à digitaliser.

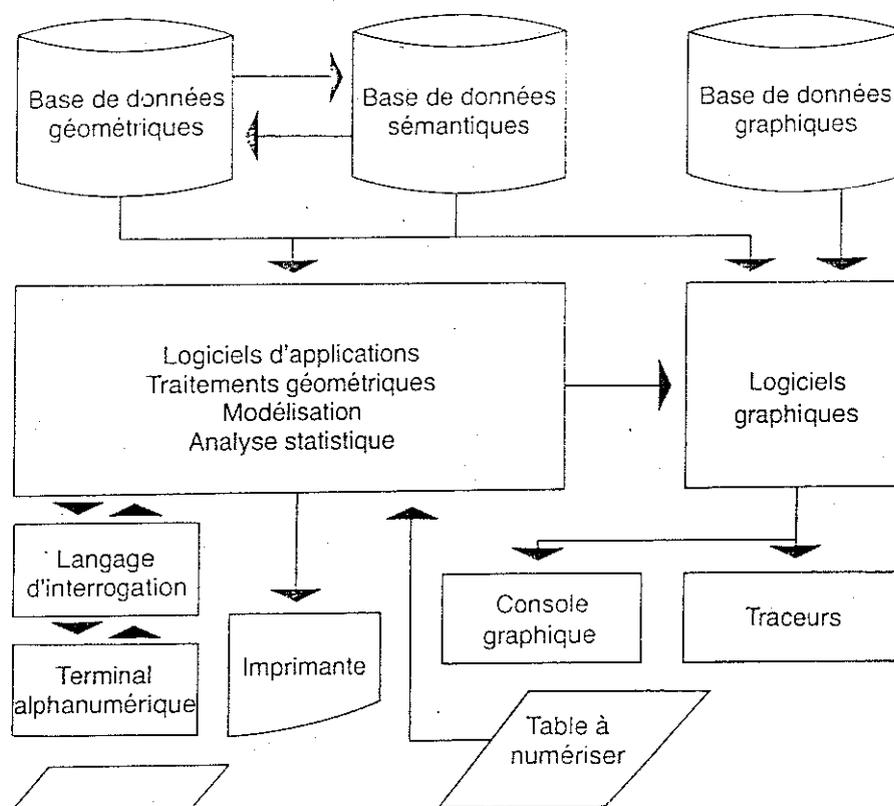


Fig. 8.6. Schéma d'un Système d'Information Géographique [tiré de STU, (1989)]

Ces systèmes associent, comme signalé ci-dessus, une information relative au terrain, que l'on peut qualifier de "topographique", transformée en une information numérique par un "Modèle Numérique de Terrain" (MNT) et une information thématique décrivant les caractéristiques liées au terrain. Les modèles numériques de terrain correspondent à ceux utilisés en cartographie et poursuivent comme objectif l'obtention d'une représentation simplifiée de la troisième dimension d'un point topographique en fonction des coordonnées planimétriques.

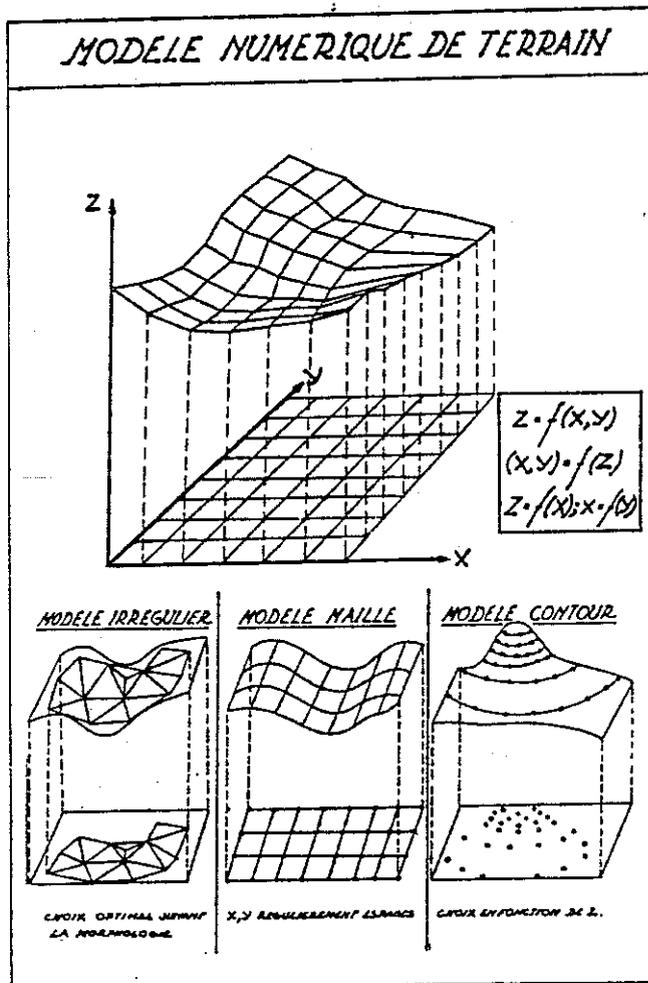


Fig. 8.7. Trois types de modèles numériques de terrain (d'après Van Twembeke (1989))

Cette relation se présente sous la forme d'une fonction :

- $z = f(x, y)$ si le modèle utilise des lignes morphologiques et des points "marquants" (modèle irrégulier)
- $(x, y) = f(z)$ si le modèle utilise les courbes de niveau (modèle continu)
- $\begin{cases} z = f(x) \\ x = f(y) \end{cases}$ si le modèle utilise un réseau régulier ou des profils (modèle maillé)

La figure 8.7 illustre ces différents types de modèles.

L'introduction de l'information thématique utilisait au départ essentiellement la technologie des bases de données. On parlait même des Systèmes d'Information Géographique comme de "Systèmes de Gestion de Bases de Données Cartographiques". L'évolution actuelle tend à intégrer d'autres ressources informatiques telles que des modèles de processus (modèles de simulation) ou encore les systèmes experts au sein de systèmes qui deviennent de véritables "Systèmes d'Aide à la Décision" (DSS ou "Decision Support Systems"). Les concepts à la base de cette intégration seront approfondis aux chapitres 9 et 10. A titre d'exemple, Badji et Mallauts (1991) présentent un tel système pour la gestion de l'irrigation (figure 8.8) qui associe système expert, modèle de simulation et bases de données par un processus de couplage entre différents modules.

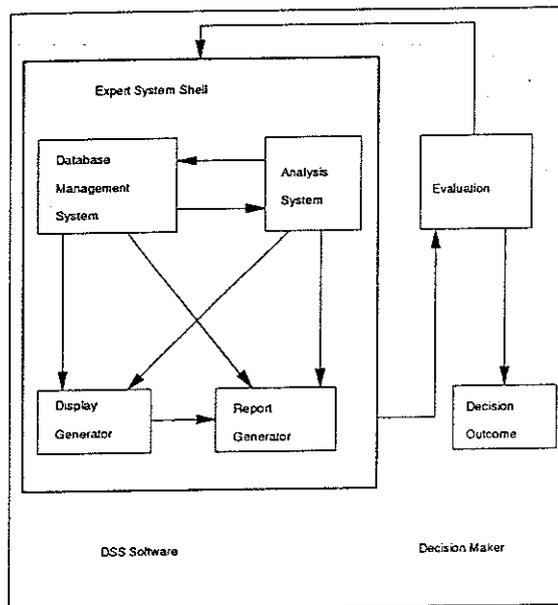


Fig. 8.8. Les différents modules d'un Système d'Aide à la Décision [extrait de Badji et Mallauts (1991)]

Une approche relativement similaire est proposée par de Zeeuw et Van Middelaar (1991) qui réalisent un couplage entre un modèle de simulation de la teneur en eau et de l'évapotranspiration des plantes et un Système d'Information Géographique afin de produire des cartes de transpiration. Dans une autre approche (Steenberghen, 1991), un Système d'Information Géographique est utilisé comme interface d'entrée pour un modèle hydraulique de surface.

L'évolution des technologies de l'information se marque évidemment également dans les Systèmes d'Information Géographique. C'est ainsi que des tentatives de développement de bases de données spatiales orientées objet s'effectuent (Webster et Omare, 1991) afin d'aboutir à une description formelle neutre de l'espace et de ses attributs.

8.3.3. Application des Systèmes d'Information Géographique

Les Systèmes d'Information Géographique donnent lieu à des applications situées dans une multitude de domaines ayant en commun la gestion de l'espace. La figure 8.9, extrait de STU (1989) en donne une liste non exhaustive, en spécifiant les fonctions assumées par les SIG pour différentes tâches.

8.3.4. Un exemple de système : le logiciel Arc/Info

Arc/Info est un Système d'Information Géographique développé par la société californienne "ESRI" (Environmental Systems Research Institute) dans le but de gérer les informations géographiques apparaissant lors d'études sur l'environnement.

Arc/Info tourne sur de nombreuses stations travail, y compris le PC, et se présente sous forme modulaire. Il offre les plus grandes fonctionnalités en matière de GIS.

TÂCHES	EXEMPLES DE DONNÉES	FONCTIONS DE CARACTÈRE GÉNÉRAL ASSUMÉES PAR LES SIG					
		Tenue à jour de fichiers géographiques données sur les opérations et les inventaires	Visualisations graphiques (dessin)	Rapports statistiques	Aménagement	Gestion	Prise de décision
Maîtrise administrative	Levés de limites	○	○				
Exploitation des ressources naturelles	Géophysique, Topo Géologie, Végétation, sols	○	+		○		
Suivi de la fiscalité et de la propriété	Levés cadastraux Enregistrement	○	○	+			
Utilisation du sol	Autorisations Servitudes				○		
Zonage de l'utilisation du sol	Documents de zonage	○	+		○		
Utilisation du sol Conception des infrastructures Construction	Levés de Génie civil Données		○		+		
Construction Documents sur les réseaux	Documents d'état des lieux des réseaux Bâtiments, etc...	○	○		+		
Améliorations Topométrie	Levés d'utilisation du sol	+	+	○	+	○	○
Inventaires Statistiques	Population, Logement Données sanitaires et économiques		+	○	○		○
Surveillance des risques	Statistiques Incendie		+	+	+	○	○
Gestion des ressources naturelles	Données en cours sur les forêts	○	○		○	○	
Surveillance de l'Environnement	Gibier Végétation Air, sols, etc...	○	+	○	○		○

○ = important + = secondaire

Fig. 8.9. Application des Systèmes d'Information Géographique (d'après STU (1989))

Les principaux modules de Arc/Info incluent:

- ARCEDIT, module de digitalisation, d'ajustement local ou global, d'entrée ou de transfert d'attributs alphanumériques.
- ARCPLOT, module d'interrogation et de production de documents cartographiques permettant de jongler avec les différentes couches de données graphiques et alphanumériques, pour générer et présenter l'information recherchée. Toutes les possibilités de symbolisme et d'habillage de cartes existent pour produire des documents sur des périphériques divers, en ce compris des fichiers de type "Postscript".
- des facilités de gestion des différentes projections cartographiques
- des facilités de communication avec différents systèmes de gestion de base de données: Oracle, Sybase, Informix, Ingres.
- un macrolangage extrêmement puissant et une interface graphique
- ARCVIEW, logiciel de consultation des données générées par Arc/Info
- ArcCAD, un module permettant d'utiliser les fonctionnalités Arc/Info au sein de AutoCAD et réalisant dès lors une intégration totale des potentialités "CAD" et "GIS" en vue d'associer harmonieusement dessin et gestion de l'information spatiale.

8.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a tenté, brièvement, de cerner les développements informatiques qui permettent d'aboutir à une meilleure représentation des données graphiques et géométriques. Ceux-ci sont énormes et apparaissent comme la conséquence de l'évolution vertigineuse des potentialités du matériel (hardware) et de l'efficacité des techniques de programmation (software).

Tous les problèmes d'environnement peuvent déboucher sur l'utilisation de telles techniques. La localisation géographique de la problématique environnementale étudiée associe automatiquement le problème à un espace et le traduit par le fait même dans des termes de gestion et d'aménagement du territoire. Les problèmes liés à la conception des bâtiments (ou de tout autre système construit) trouvent dans les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur des outils de travail précieux permettant l'introduction rapide et aisée des données géométriques. L'évolution actuelle de ces systèmes les rend de plus en plus performants et leur confère de plus en plus un caractère intégrateur en leur associant des outils de gestion de bases de données, des mécanismes d'inférence issus de l'Intelligence Artificielle et des Systèmes Experts, des procédures de recherche et de guidance de l'utilisateur.

Dans des problèmes d'ordre plus général, les acquis de la cartographie et son automatisation de même que son informatisation ont débouché sur le développement des "Systèmes d'Information Géographique". De la même façon que pour la CAO, ces outils se sont vu doter progressivement des ressources informatiques supplémentaires leur permettant de dépasser de très loin les potentialités de la seule cartographie et de rejoindre les préoccupations de la discipline-mère, à savoir la géographie par la prise en compte de tous les facteurs naturels, techniques et humains, liés à l'espace.

Le parallèle entre l'évolution des logiciels de CAO et de SIG se renforce d'autant plus que des passerelles (par exemple "ArcCAD") commencent à être jetées entre les deux domaines sous la forme de systèmes "universels", à l'architecture ouverte et modulaire permettant une communication optimale entre des problèmes localisés à des échelles très différentes .

Enfin, tant pour la CAO que pour les SIG, la tendance actuelle les considère de plus en plus comme des composantes d'environnements logiciels encore plus larges, encore plus généraux qui réalisent l'intégration, par des méthodologies efficaces, des différents outils informatiques. Les systèmes deviennent alors des Systèmes d'Aide à la Décision (Decision Support System) dont les Systèmes d'Aide à la Conception (Design Support Systems) peuvent être considérés comme une "instanciation" à un problème particulier. Les deux chapitres à venir ont pour objet de clôturer ce travail en abordant le problème crucial de l'intégration des systèmes.

CHAPITRE 9.

INTÉGRATION

9.1. INTRODUCTION

Les chapitres précédents ont tenté de cerner les potentialités de différentes ressources informatiques dans l'optique d'apporter une contribution à la résolution d'un problème environnemental, en particulier celui de la conception d'un bâtiment. A ce titre, différents outils, émergeant à des catégories bien distinctes de logiciels ont fait l'objet d'une analyse et d'une application spécifiques. Leur apport, en termes d'efficacité, de puissance, de convivialité a été évalué, de même que les limites individuelles de chacun des intervenants : chacun apporte une contribution significative mais force est de reconnaître qu'aucun de ces outils ne peut englober à lui seul les nombreuses facettes de la solution. Au contraire, la complémentarité entre les spécificités de chacun des acteurs informatiques d'un projet suggère de les associer harmonieusement afin de tirer parti de leurs qualités respectives.

Dans ce but, il pourrait être fait un usage séquentiel des différents logiciels. Cette façon de procéder ne dégagerait cependant pas l'utilisateur d'une multitude de contraintes et de lourdeurs d'exécution : réintroduction successive des mêmes données, interprétation et traduction des résultats d'un outil vers l'autre, manque de coordination dans l'organisation séquentielle du travail. Par conséquent, une autre solution s'impose. Elle réside dans la réalisation de l'intégration des acteurs logiciels au sein d'un système unique permettant d'éviter les inconvénients mentionnés ci-dessus et de procurer à l'utilisateur un réel environnement de travail, dédié à la tâche demandée, et donnant accès, de façon coordonnée, aux différentes ressources mises en oeuvre.

C'est l'objet de ce chapitre que de présenter une méthodologie d'intégration de ressources informatiques en vue de la considération et de la résolution d'un problème environnemental suivant ses différentes facettes. La démarche proposée examine tout d'abord les contraintes à satisfaire par un tel système et débouche sur le cahier des charges du projet; ensuite diverses architectures, de complexité croissante, sont proposées et aboutissent à la définition d'une solution adéquate basée sur la définition d'une structure neutre et centrale agissant comme un agent intermédiaire entre les différents acteurs. Cette structure s'appuie sur les concepts de la Programmation Orientée Objet (POO) et offre beaucoup d'avantages en regard des contraintes formulées. L'intégration procède alors à la connexion des ressources à la structure centrale, en respectant les spécifications d'une architecture modulaire. Reste alors à résoudre les problèmes d'arbitrage entre les intervenants au moyen de techniques d'analyse multicritère et de coexistence de différents logiciels dans un système d'exploitation par essence monotâche et à la gestion de la mémoire assez rudimentaire. L'ensemble de la démarche est couronnée par le développement d'une interface-utilisateur apte à tirer parti de toutes les ressources du système.

Suivant une logique retenue tout au long de ce travail, la méthodologie proposée se voit préférentiellement appliquée à des problèmes situés dans le contexte de la physique et de la

conception de bâtiments. Cette orientation permet d'utiliser les acquis des chapitres précédents et présente suffisamment de facettes que pour constituer un test significatif pour la méthodologie. La démonstration de la pertinence des concepts proposés encourage la mise en oeuvre d'une série d'applications alternatives qui feront l'objet du chapitre suivant.

9.2. LES CONTRAINTES À SATISFAIRE PAR L'INTÉGRATION DES RESSOURCES

9.2.1. Spécifications relatives à l'architecture du logiciel

Avant de procéder au développement de la méthodologie d'intégration, il convient de cerner quelles en sont les contraintes et les objectifs afin de guider la technique vers une solution réaliste. Cette étape permettra d'élaborer un premier jet de cahier des charges du système projeté.

Tout d'abord, le système intégré apparaît d'emblée destiné au "monde PC". Ceci introduit des contraintes assez fortes sur l'architecture du logiciel. La limitation de la machine et, en particulier, de son système d'exploitation (le DOS) exigent l'exploitation maximale des capacités disponibles mais peut également déboucher sur une solution aisément portable vers des machines et des systèmes plus évolués. La raison d'être de ce choix réside essentiellement dans le grand nombre d'outils et de logiciels disponibles pour ce type de machine et également dans le fait que ce type de produit vise un public ou une "clientèle" aussi large que possible, ce qui justifie le déplacement vers les systèmes "bas de gamme".

D'autre part, même si l'illustration de la méthodologie se fera, dans une première approche, sur un problème de conception de bâtiment, l'architecture proposée devra se montrer suffisamment souple que pour embrasser toute une gamme de problèmes d'aide à la décision appartenant à des domaines extrêmement diversifiés, dans le contexte environnemental. Cette perspective génère évidemment son lot de contraintes supplémentaires. Entre autres, la possibilité de réutiliser une partie du code développé en passant d'une application à l'autre, sera un avantage apprécié.

Par ailleurs, d'autres contraintes affectent l'architecture du logiciel (André et Nicolas, 1993).

- Le système intégré doit centraliser l'intégralité (ou du moins la plus grande partie) de l'information requise pour le processus d'aide à la décision.

- Le système intégré doit rester facile d'emploi, "user-friendly", et permettre une introduction des données par l'intermédiaire d'une interface graphique en automatisant au maximum des tâches consommatrices de temps et fastidieuses pour l'utilisateur.
- Le système intégré doit être à même de donner une réponse rapide à des problèmes d'évaluation de l'impact d'une solution. Ceci signifie que des méthodes simplifiées doivent être disponibles aux côtés de modèles plus complexes dédiés à une analyse plus fine.
- Le processus de prise de décision doit rester l'apanage de l'utilisateur : le système doit avant tout proposer une (des) solution(s) possible(s) sans prendre aucune décision, de quelque nature qu'elle soit. En d'autres termes, le contrôle de la prise de décision doit être réalisé par l'utilisateur.
- L'architecture du système intégré doit se montrer suffisamment ouverte que pour intégrer un nombre quelconque d'outils. De plus, le système doit être capable de fonctionner, qu'une ressource donnée soit présente ou absente.

Ces contraintes rejoignent quelques unes de celles proposées par Hastings (1986) à l'égard des outils de conception énergétique pour architectes.

9.2.2. Spécifications relatives aux logiciels à intégrer

Les outils logiciels envisagés dans le cadre de ce processus d'intégration émergent évidemment aux familles ou catégories dont l'étude a été entreprise de façon plus détaillée dans les chapitres précédents de ce travail. Chacune de ces catégories véhicule en effet un certain type d'information, complémentaire par rapport aux autres et participant à l'élaboration de la solution.

Concrètement, le logiciel intégré devra se montrer apte à permettre la connexion des éléments suivants :

- des logiciels de simulation numérique, armés de leur processus de validation et de calibration,
- des bases de données manipulées par des systèmes de gestion de bases de données courants (ex "DBASE IV") ou dédiés (ex. "BMW", cf. chapitre 6),
- des systèmes experts, qu'ils aient été développés à partir d'un générateur de système expert ("shell") ou spécifiquement à partir d'un langage de programmation classique ou adapté,

- des logiciels de création graphique : CAO ou SIG, essentiellement des produits commerciaux,
 - des logiciels classiques de manipulation des données : éditeurs de texte ou tableurs.
- Le caractère courant de ce type de logiciel n'a pas justifié de leur consacrer une analyse approfondie dans le cadre de ce travail.

La figure 9.1 représente, de façon formelle, le processus d'intégration des logiciels.

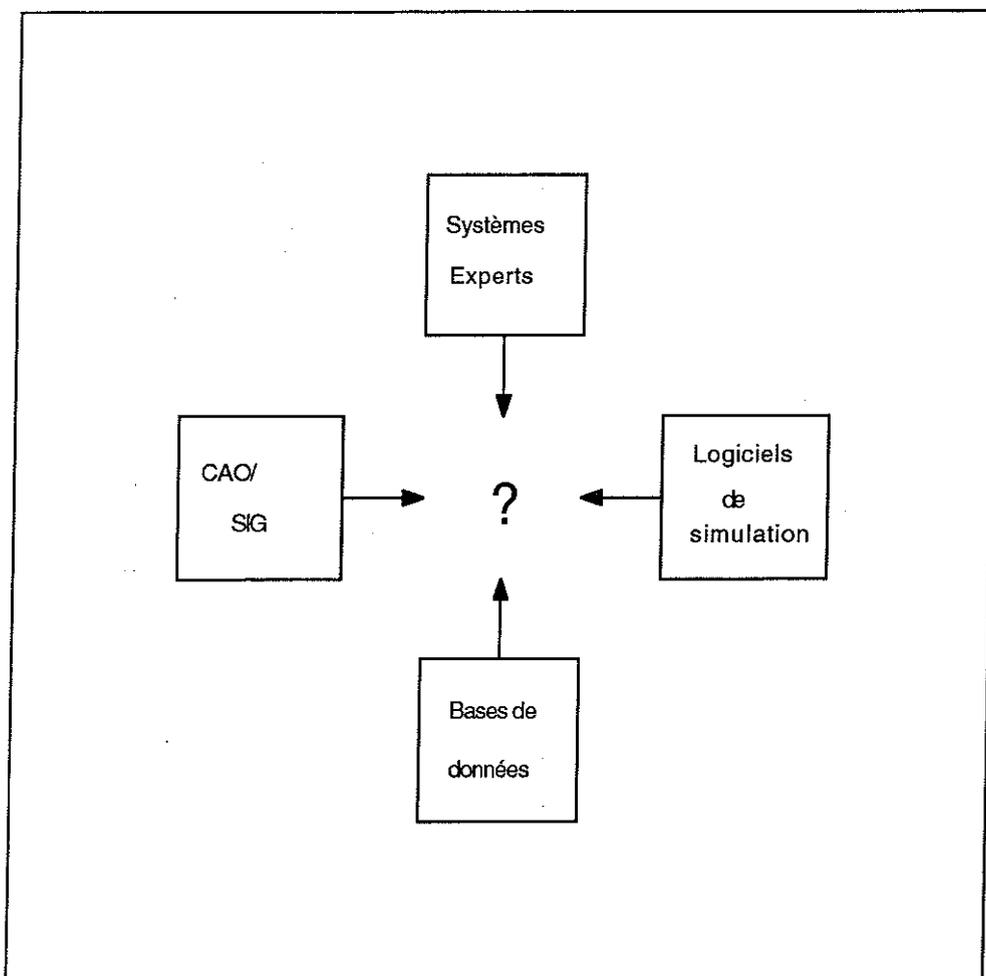


Fig. 9.1. Processus de communication de logiciels au sein d'un logiciel intégré

L'ensemble de ces spécifications constitue un cahier des charges du logiciel intégré. Il reste à développer une architecture qui permette de rencontrer ces différentes spécifications.

9.3. MISE EN OEUVRE DE L'INTÉGRATION POUR UN PROBLÈME DE CONCEPTION DE BÂTIMENTS

9.3.1. Méthodes d'intégration (André, 1989 b)

A partir des spécifications données ci-dessus et du choix des logiciels à réunir au sein d'un logiciel intégré, différentes techniques peuvent être mises en oeuvre afin de créer et gérer un processus de communication entre différents intervenants logiciels.

9.3.1.1. Couplage "Base de données - logiciel de simulation"

Dans le contexte particulier de la physique du bâtiment et, entre autres aspects, du problème de la conception des bâtiments, le premier besoin qui se fait sentir concerne une simplification de la lourde tâche d'introduction des données dans un logiciel de simulation. Le problème a été soulevé au chapitre 5 (Simulation) et les considérations émises au chapitre 6 (Bases de données) suggèrent de réaliser une première intégration de ces deux ressources en permettant à un ensemble de données telles que les propriétés des matériaux mis en oeuvre d'être introduits de façon automatique ou quasi-automatique dans les fichiers d'entrée du logiciel de simulation. La figure 9.2 représente la démarche sur le plan de principe. Elle montre que la gestion du processus de communication est assurée par une interface de contrôle permettant d'accéder, de façon séquentielle, aux deux logiciels impliqués à savoir, le logiciel de simulation et le système de gestion de la base de données et, le cas échéant, de réaliser le transfert d'information entre les deux composants.

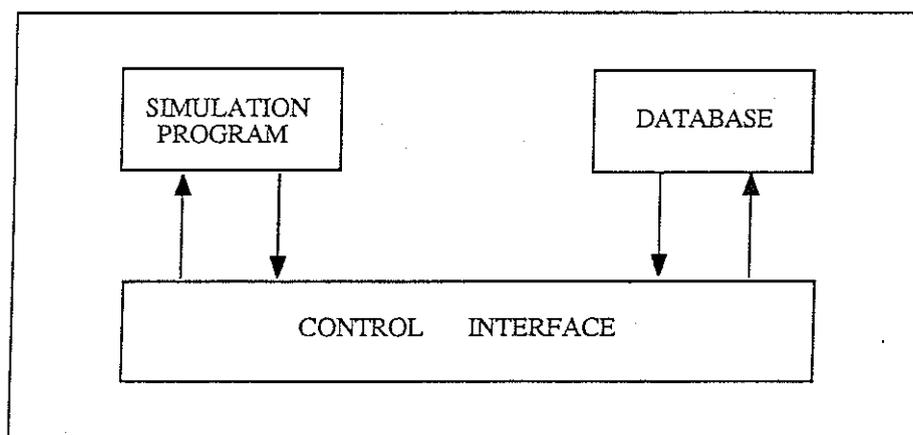


Fig. 9.2. Intégration d'un logiciel de simulation et d'une base de données

Ted quel

Un premier prototype ("IBDS"), correspondant à cette structure, a été réalisé en 1989, afin de constituer un support initial au travail entrepris dans cette thèse. Dans ce cadre, l'accent a surtout été mis sur le développement d'une interface-utilisateur souple permettant d'accéder aux différents modules du système. La première version de IBDS ("Integrated Building Design Software") comprenait 7 modules :

1. Un gestionnaire de fichiers qui permet de créer, charger, sauver, lister, détruire des applications ("FILE")
2. Un éditeur de textes ("EDIT")
3. Un système de gestion de bases de données constitué par le logiciel "BMW" et accessible par le module "DATA"
4. Le préprocesseur météorologique de MBDSA ("PRET")
5. Le préprocesseur "bâtiment" de MBDSA ("PREPA")
6. Le module de calcul thermique de MBDSA ("MBDS")
7. Le postprocesseur de MBDSA ("POSTA")

Le logiciel a été développé en Turbo-Pascal et mettait en oeuvre une exécution séquentielle des différents modules, certains d'entre eux étant constitués de routines internes à IBDS (File, Edit, Data), d'autres étant fournis par des logiciels extérieurs (les modules de MBDSA) activés par la commande ("Execute") du Turbo-Pascal. Le système ne réalisait aucun transfert automatique de données et constituait dès lors une intégration extrêmement rudimentaire de logiciels. La figure 9.3 montre une vue de l'interface-utilisateur, basée sur des menus déroulants et des menus horizontaux activés par le clavier.

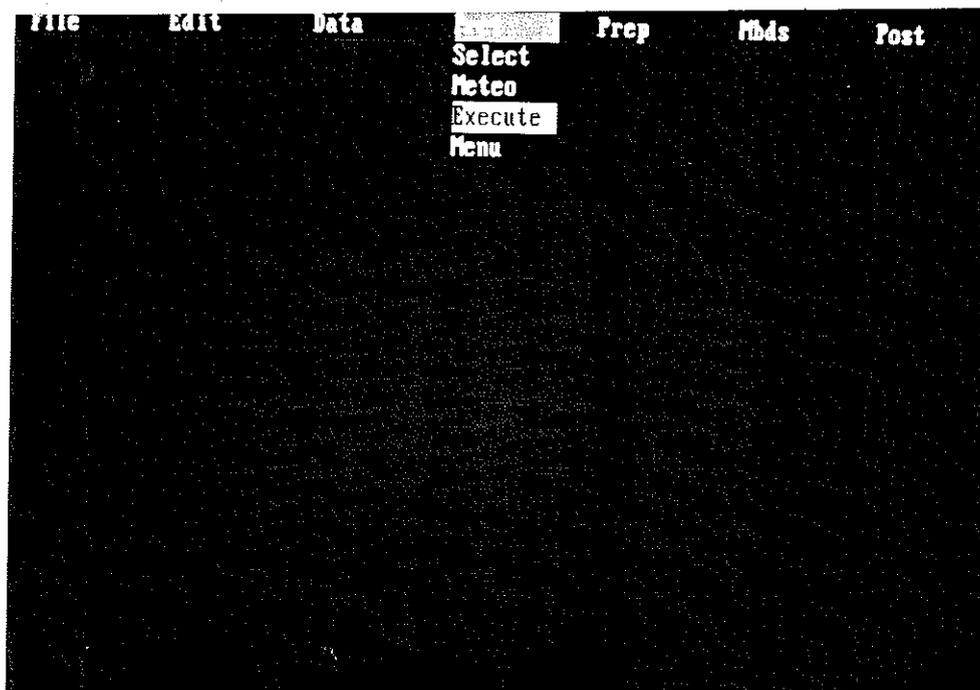


Fig. 9.3. Interface-utilisateur de IBDS

Cette interface-utilisateur constitue la contribution essentielle de IBDS et sera d'ailleurs largement réutilisée dans des versions ultérieures du logiciel intégré.

9.3.1.2. Introduction des systèmes experts

Les systèmes de gestion de bases de données permettent d'introduire un certain type d'information dans les logiciels intégrés : une information certes structurée mais dépourvue de la moindre capacité d'expertise ou d'intelligence. Par conséquent, la limitation à ce type d'information constitue une restriction de taille à la puissance et à l'efficacité des logiciels intégrés. L'introduction de la technologie des systèmes experts permet de pallier à certains inconvénients : elle autorise la manipulation d'une information "cognitive", basée sur un choix d'heuristiques et de règles conduisant à l'obtention d'un système réellement "intelligent", c'est-à-dire apte à réaliser une certaine forme de raisonnement. A titre d'exemple, le système expert pourra déduire d'un mécanisme d'expertise la valeur d'un certain coefficient ou pourra réaliser des opérations a priori complexes comme le "zonage" d'un bâtiment (détermination des zones thermiques) ou encore le contrôle de la validité des données et l'interprétation "intelligente" des résultats. Il pourra même éventuellement évaluer l'esthétique d'une conception, par exemple suivant des procédures décrites par Manning (1991). La réalisation pratique de l'interfaçage peut se baser sur deux schémas. Le premier (fig. 9.4) constitue une simple évolution du niveau d'intégration précédent (fig. 9.2) et le transfert de l'information est contrôlé par l'utilisateur via une interface-utilisateur adéquate

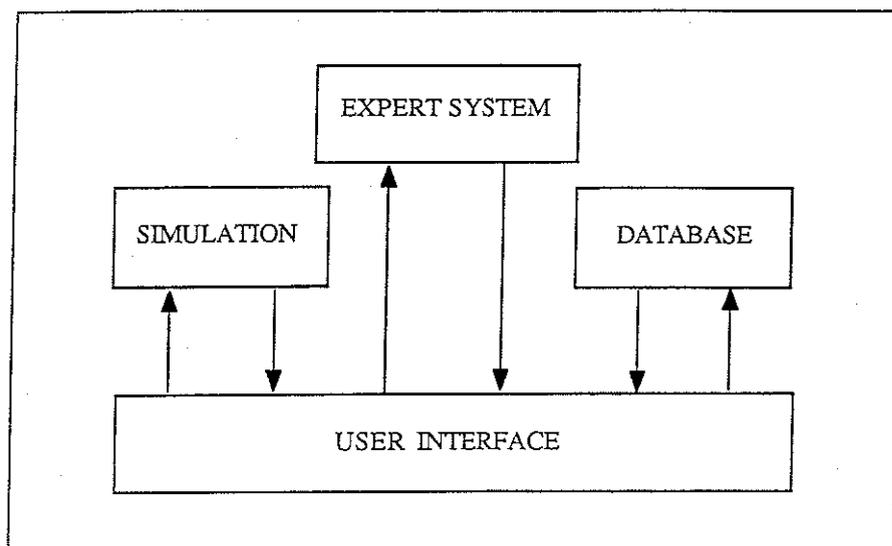


Fig. 9.4. Intégration d'un logiciel de simulation et d'une base de données et d'un système expert

Dans une architecture plus évoluée, le mécanisme de transfert de l'information a lieu par l'intermédiaire d'un agent relié aux différents intervenants. Cet agent, que l'on peut qualifier de "boîte aux lettres" constitue le point névralgique du système et son implémentation peut utiliser différents formalismes évolués : fichiers, bases de données orientées objet, ... Nous reviendrons sur ce problème plus loin. La figure 9.5 représente schématiquement ce principe.

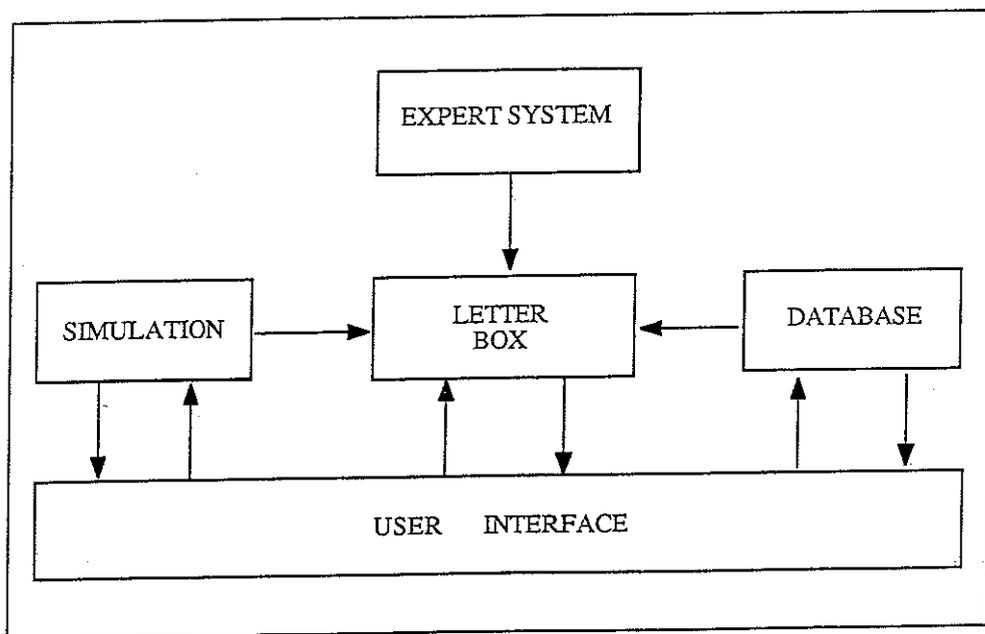


Fig. 9.5. Intégration d'un logiciel de simulation et d'une base de données et d'un système expert par l'intermédiaire d'une "boîte aux lettres" commune

La problématique de l'interfaçage entre systèmes experts et bases de données a fait l'objet de travaux importants aux Etats-Unis (Stanford et Carnegie Mellon). Rehak et Howard (1985) et Howard et Rehak (1989) proposent des solutions extrêmement élaborées, basées sur double considération des aspects sémantique (le "fond") et syntaxique (la "forme") de la question et sur l'utilisation conjointe de schémas locaux et globaux reliés entre eux par des modules d'interface.

9.3.1.3. Introduction des ressources de la CAO

Comme signalé au chapitre précédent ("Infographie"), les ressources de la Conception Assistée par Ordinateur permettent d'amplifier, de manière considérable, la facilité d'emploi des logiciels de simulation en allégeant la tâche, la plus fastidieuse, d'introduction des données géométriques. La complexité des données manipulées et traitées par les systèmes de CAO (des entités essentiellement graphiques) impose le recours à une architecture évoluée, centrée sur un "agent de transfert" (boîte aux lettres) pour l'intégration. La figure 9.6 montre le schéma conceptuel de cette architecture.

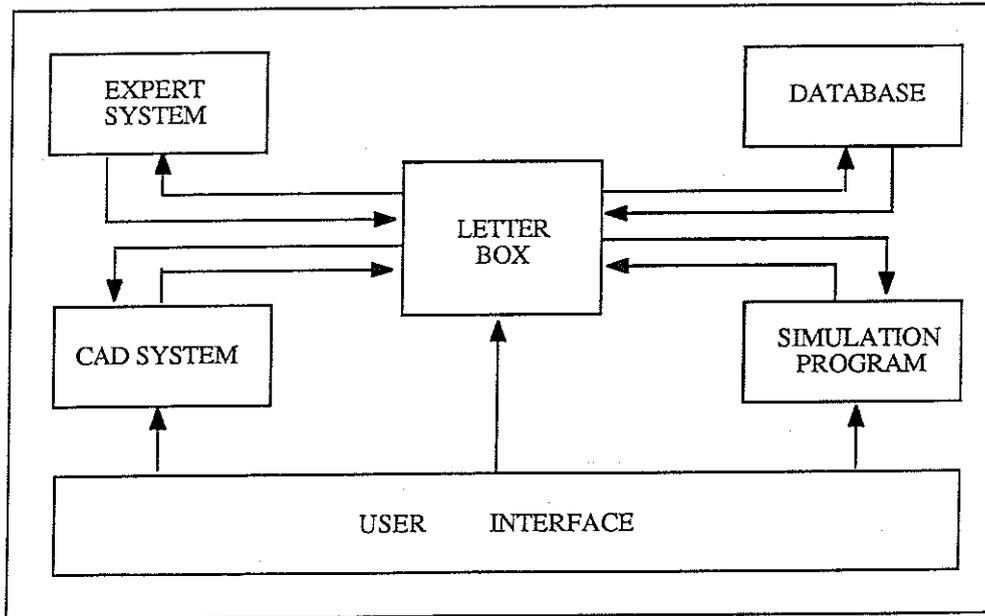


Fig. 9.6. Intégration d'un logiciel de simulation, d'une base de données, d'un système expert et d'un outil de CAO par l'intermédiaire d'une boîte aux lettres

Les contraintes et objectifs formulés ci-dessus impliquent le recours à l'architecture la plus évoluée afin de satisfaire les besoins du système. Par conséquent, le schéma conceptuel de la figure 9.6 constitue le point de départ de notre travail. Il y a lieu maintenant de définir les possibilités d'implémentation de ce schéma conceptuel en tenant compte des limitations inhérentes à la plate-forme de développement retenue et, en particulier, de son système d'exploitation. La stratégie de développement dépend de plus fortement du formalisme sélectionné pour la boîte aux lettres (structure que l'on peut qualifier, au vu de la figure 9.6., de "centrale") et justifie l'attention particulière portée à cette dernière dans le paragraphe suivant.

9.3.2. Choix et développement de la structure centrale

9.3.2.1. Choix du formalisme

Ce choix s'avère capital et conditionne toute la suite du travail. En l'occurrence, il s'agit de concevoir un formalisme de représentation (en quelque sorte, un "modèle") informatique permettant de représenter le système étudié (le bâtiment) dans toute sa complexité et sa structuration et de traduire dans ce modèle le caractère hiérarchisé et également évolutif de ce système. Pour ce faire, le monde informatique procure un certain nombre d'outils :

- les fichiers d'enregistrement
- les bases de données relationnelles
- la programmation orientée objet
- les bases de données orientées objet

En fonction des objectifs poursuivis, le choix de fichiers d'enregistrements apparaît beaucoup trop restrictif et ne permet pas d'implémenter de façon satisfaisante les concepts de structuration, de hiérarchie et d'évolution. Le passage aux bases de données apporte déjà une certaine amélioration à ces différents points de vue mais se montre toutefois encore trop rigide et inapte à supporter la représentation d'entités complexes telles que celles qu'un projet de bâtiment est susceptible de véhiculer (Morel, 1989). Par conséquent, il apparaît rapidement nécessaire de passer à un formalisme de représentation plus évolué, à savoir la programmation orientée objet. Par rapport à cette dernière, les bases de données orientées objet ajoutent seulement la propriété de persistance, à savoir la connexion entre les objets existant en mémoire volatile (RAM) et en mémoire de masse (disque).

Les concepts de la Programmation Orientée Objet (Silverio, 1991) s'articulent autour de cinq notions fondamentales :

- l'objet
- la classe
- l'héritage
- le polymorphisme
- la liaison dynamique

suivant un schéma représenté à la figure 9.7.

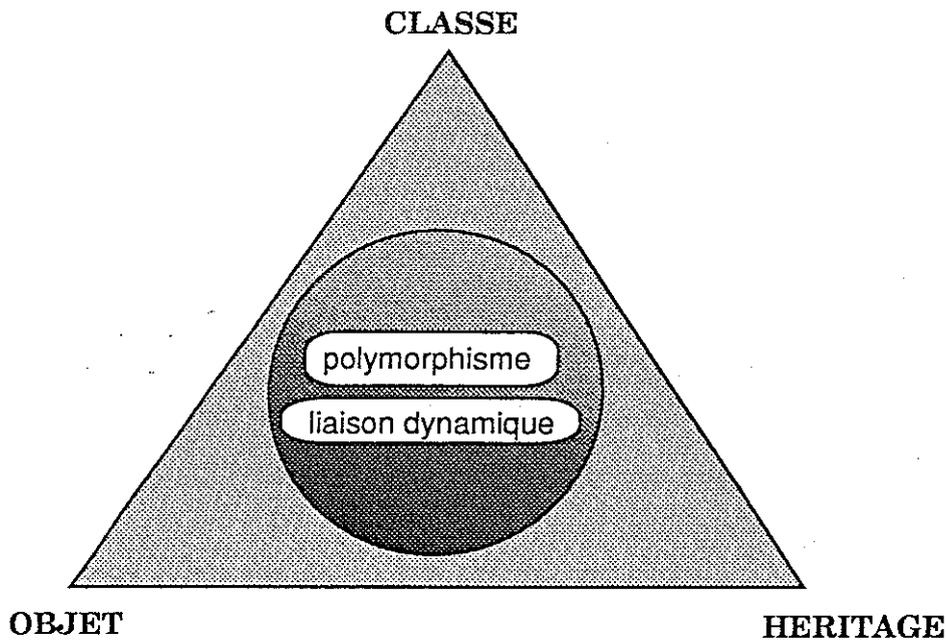


Fig. 9.7. Concepts de base de la Programmation Orientée Objet [d'après Silverio (1991)]

Composant fondamental de la représentation, l'objet apparaît comme une entité constituée de données (au même titre que les "variables" usuelles des langages de programmation) et de procédures et fonctions (les méthodes) qui déterminent son comportement. La réunion des deux types de composantes constitue l'encapsulation : la structure de données et les méthodes attachées à l'objet forment un tout et les données ne sont accessibles que par l'intermédiaire des méthodes. De cette encapsulation découle la possibilité d'attacher trois types de propriétés à un objet :

- des propriétés "intrinsèques", analogues aux champs d'un enregistrement (record) ou d'une base de données
- des propriétés "relationnelles" par l'intermédiaire de pointeurs d'un objet vers un autre
- des propriétés "activées" ou "méthodes" qui demandent à l'objet d'exécuter une certaine opération sur lui-même ou de calculer une nouvelle propriété à partir d'autres propriétés intrinsèques.

De plus, dans les implémentations les plus évoluées, il est possible de "cacher" certaines propriétés et de les rendre inaccessibles à toute autre variable que l'objet lui-même (séparation entre la partie publique et la partie privée d'un objet).

9.3.2.2. Choix du langage

Toutes ces caractéristiques permettent de rencontrer les spécifications requises par la formulation sélectionnée. Pour réaliser l'implémentation de ces concepts, le choix s'est porté sur un langage de programmation "de haut niveau", à savoir le Pascal à partir de sa version "Turbo-Pascal 5.5" (Borland, 1988), en raison de la familiarité ressentie avec cet environnement de développement. Une alternative dans l'air du temps aurait été constituée par le langage C++, mais un rapide examen des caractéristiques des deux compilateurs n'a pas dégagé d'argument significatif en faveur de l'implémentation "orienté-objet" du langage "C". Cette option ne constitue d'aucune manière, un jugement de valeur définitif posé entre les deux langages mais résulte plutôt d'un compromis entre la facilité de développement et la puissance du langage. Il n'est pas exclu qu'une version "professionnelle" du système proposé dans ce texte ne s'articule autour de C++ à cause des contraintes supplémentaires à satisfaire par un tel logiciel.

9.3.2.3. Développement de la structure

En utilisant les concepts évoqués ci-dessus, le problème consiste à définir une hiérarchie d'objets apte à représenter de la façon la plus complète et la plus flexible possible, le système qui figure au centre de l'étude, à savoir le bâtiment. De nombreuses tentatives ont lieu dans ce sens de par le monde (Morel, 1989), (Wiltshire, 1989), (Bjork, 1989 a), (Bjork, 1989b), (Bjork, 1990) et la tendance actuelle semble pousser la recherche vers la problématique de la normalisation et le développement d'un "Building Product Model" analogue aux standards déjà utilisés dans certains domaines de l'industrie. La première phase du projet COMBINE des Communautés Européennes (Augenbroe, 1992) a été entièrement consacrée à cette problématique.

En toute modestie, l'approche entreprise dans ce travail à ce sujet ne revêt certainement pas un caractère original. Basée essentiellement sur une approche intuitive et influencée par les caractéristiques des logiciels à interfacer, elle est avant tout animée d'un souci d'efficacité (afin de permettre un prototypage extrêmement rapide) et d'aptitude à la généralisation (afin de pouvoir s'adapter à d'autres problèmes). Pour ces raisons, la démarche se situe quelque peu en marge de l'effort de normalisation évoqué ci-dessus et ne se pose d'aucune manière en concurrent vis-à-vis des autres tentatives.

Ceci étant précisé, le développement de ce que nous conviendrons dorénavant d'appeler la Structure d'Echange de Données ("Data Exchange Structure") a débuté par la définition d'un certain nombre de classes et d'une hiérarchie entre ces classes. L'implémentation de la hiérarchie a utilisé les concepts d'héritage et de propriétés relationnelles. Le tableau 9.1 résume les classes définies, les relations définies par un processus d'héritage et les relations définies par les propriétés relationnelles (exprimées par des pointeurs) entre les objets. La nature des relations définies dépend de la définition des objets, l'héritage matérialisant toujours une relation de type "est une sorte de" ("is a kind of"), selon la terminologie en vigueur.

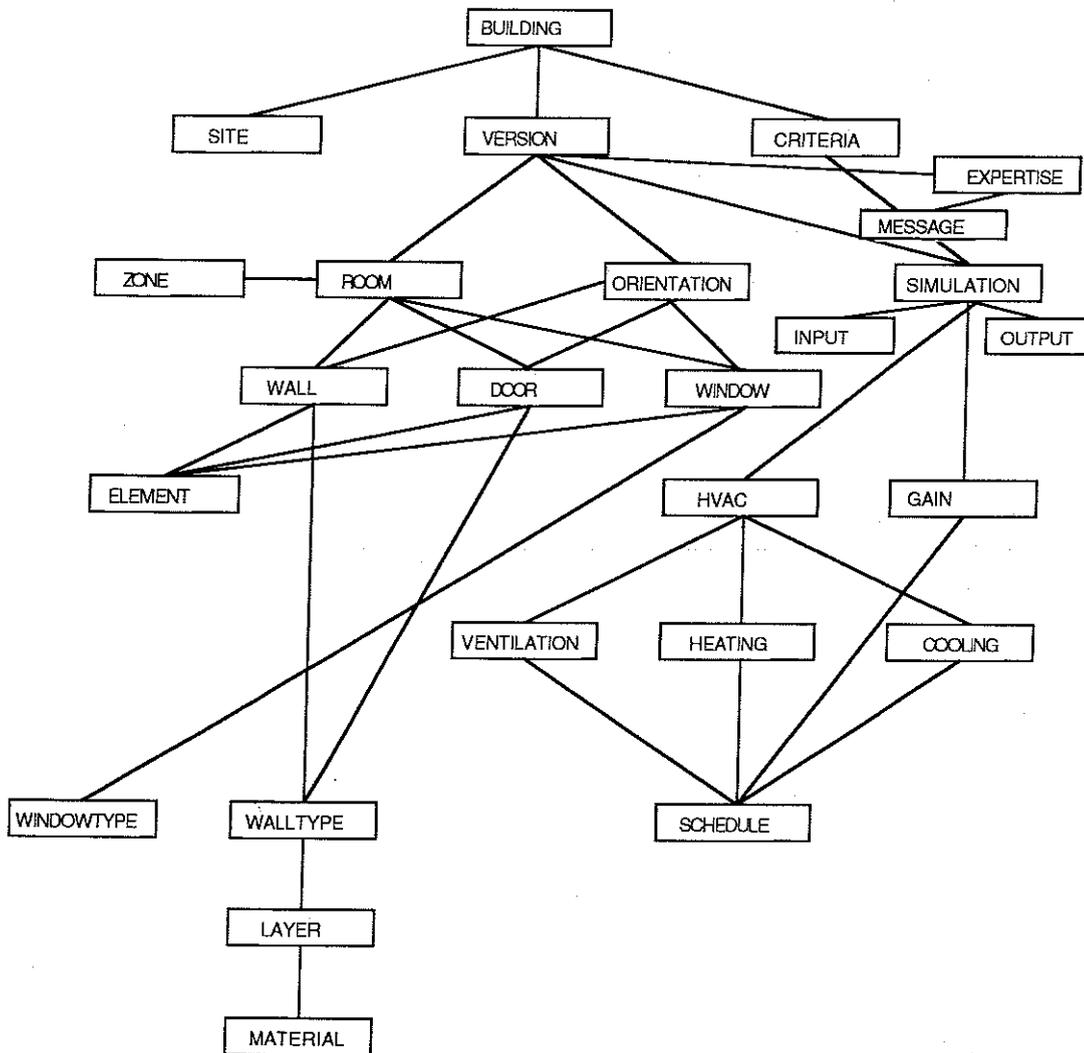


Tableau 9.1. Définition des classes, de leur hiérarchie et de leurs relations. Toutes les classes reprises sur cette figure héritent de la classe "generic".

Ensuite, chacune des classes s'est vue nantie de propriétés intrinsèques (les attributs de la classe) et de propriétés activées (les méthodes de la classe). Une classe courante dans le cas d'un bâtiment est constituée par les objets de type "mur" (wall). Afin d'illustrer les concepts évoqués ci-dessus, voici une image de l'implémentation de cette classe :

Wall = object (element); [la classe "wall" hérite de la classe "element"]

PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES

coupling	:	real;	[facteur de couplage du mur]
nwindows	:	integer;	[nombre de fenêtres]
ndoors	:	integer;	[nombre de portes]

PROPRIÉTÉS RELATIONNELLES

pwalwat	[relation avec le type de mur]
pwalzon	[relation avec les deux zones séparées par le mur]
pwalwin	[relation avec les fenêtres incluses dans le mur]
pwaldoor	[relation avec les portes incluses dans le mur]

PROPRIÉTÉS ACTIVÉES

init	[procédure d'initialisation ou "constructeur" du mur]
area	[calcul de la surface du mur]
volume	[calcul du volume du mur]
edit	[éditeur de la classe mur]

L'héritage de la classe "element" signifie que toutes les propriétés de cette dernière classe sont également partagées par la classe "wall". Dans un langage de taxonomie, la classe "wall" constitue une spécialisation de la classe "element" alors que cette dernière constitue une généralisation de la classe "wall". En d'autres termes, les propriétés citées ci-dessus se complètent des propriétés suivantes, exprimées par l'implémentation de la classe "element" :

element = object (generic); [la classe "element" hérite de la classe "generic"]

PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES

xa	:	real;	[coordonnée en x du coin inférieur gauche]
ya	:	real;	[coordonnée en y du coin inférieur gauche]
za	:	real;	[coordonnée en z du coin inférieur gauche]
xb	:	real;	[coordonnée en x du coin supérieur droit]
yb	:	real;	[coordonnée en y du coin supérieur droit]
zb	:	real;	[coordonnée en z du coin supérieur droit]
emit	:	real;	[émissivité]
boundary	:	real;	[condition aux limites éventuelle]

PROPRIÉTÉS ACTIVÉES

length	: real;	[longueur du mur]
thickness	: real;	[épaisseur du mur]
height	: real;	[hauteur du mur]
area	: real;	[surface du mur]
uvalue	: real;	[coefficient de transmission thermique]
exist	: boolean;	[test logique d'existence du mur]

PROPRIÉTÉS RELATIONNELLES

peltwal	[relation avec le mur considéré]
---------	----------------------------------

Comme on peut le voir, la classe "element" hérite elle-même d'une classe plus générale, la classe "generic" qui contient des propriétés communes à toutes les classes de la représentation. Cet héritage transmet les propriétés suivantes à la classe "element" et, de là, à la classe "wall". L'implémentation de la classe "generic" est la suivante:

generic = object;

PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES

tag	: string;	[identification de l'objet]
name	: string;	[nom de l'objet]
number	: integer	[numéro de l'objet]
color	: integer	[couleur caractéristique de l'objet]

PROPRIÉTÉS ACTIVÉES

draw;	[dessin d'une représentation iconique de l'objet]
-------	---

La figure 9.8 schématise l'ensemble du processus et la position de la classe "wall" par rapport à la structure générale de la représentation objet.

Une démarche identique a été mise en oeuvre pour toutes les classes du tableau 9.1 et l'ensemble constitue la représentation orientée objet du système bâtiment.

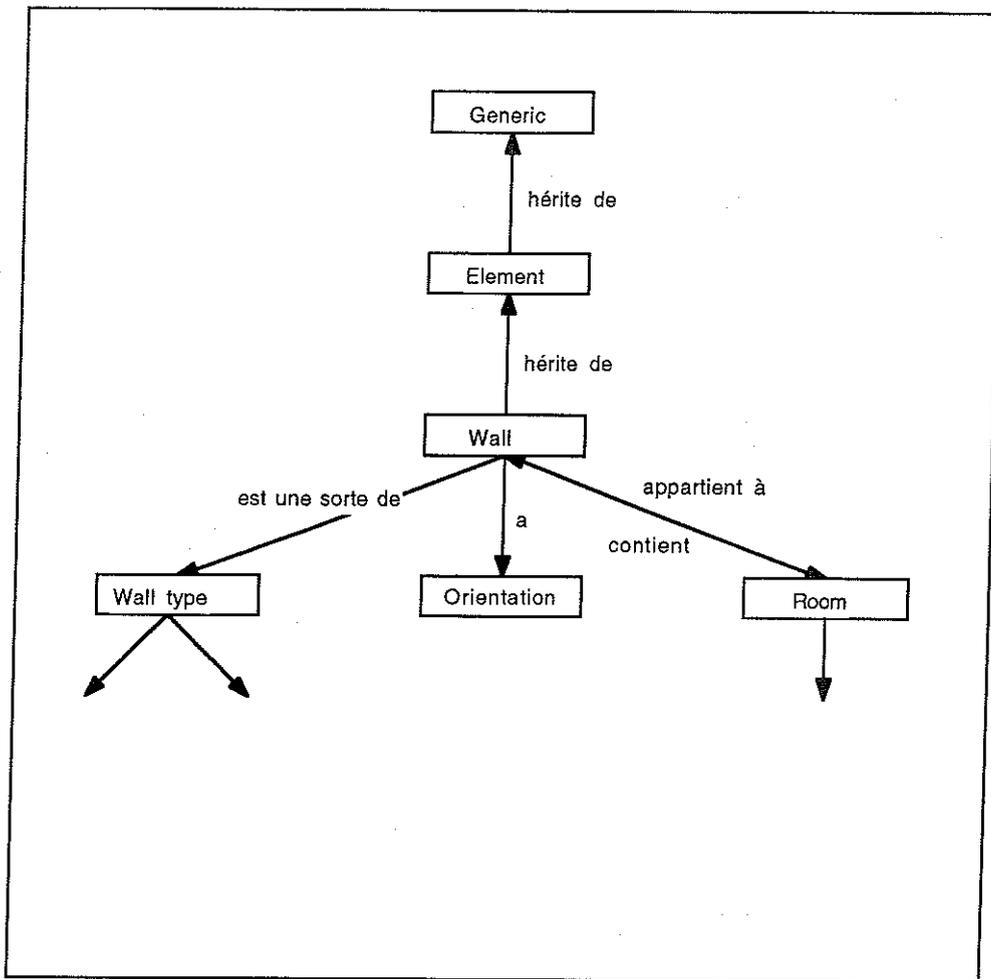


Fig. 9.8. La classe "Wall" dans la représentation "objet" choisie

9.3.3. Développement des modules d'interface

9.3.3.1. Généralités

Le choix de la structure d'échange des données permet de poser le problème des modalités d'interface avec les différentes composantes du logiciel intégré. Autrement dit, il convient d'abord de résoudre le problème du point de vue conceptuel. Un rappel des spécifications du système (9.2.1) permet d'orienter la solution. La nécessité de disposer d'une architecture ouverte et suffisamment flexible impose que l'interface d'un composant soit totalement indépendant de celui des autres. Ce constat débouche sur le concept de "module d'interface". Chaque composant du système intégré sera interfacé à la structure d'échange de données par l'intermédiaire d'un tel module, capable de réaliser un processus de communication bidirectionnel entre les deux parties. La figure 9.9 représente le schéma conceptuel de ce processus.

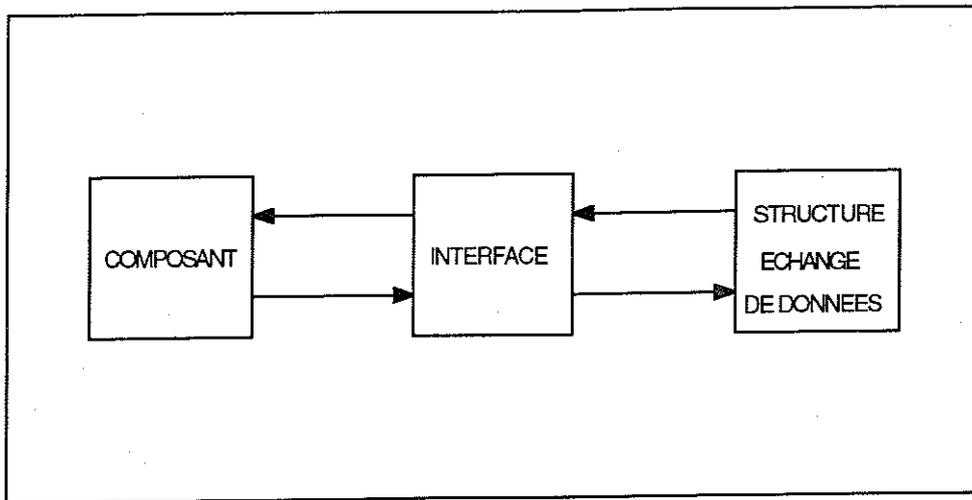


Fig. 9.9. Schéma conceptuel de l'interfaçage entre un composant du système intégré et la structure d'échange de données

Le transfert d'informations entre le composant et son module d'interface est assuré par l'intermédiaire des fichiers d'entrée/sortie (qui dépendent du logiciel concerné) du composant, lesquels sont soumis à des opérations de lecture/écriture de la part du module d'interfaçage. Le second transfert est assuré par des méthodes associées aux objets de la structure d'échange de données et activées par le module d'interfaçage. La figure 9.10 détaille la figure 9.9 à ce sujet.

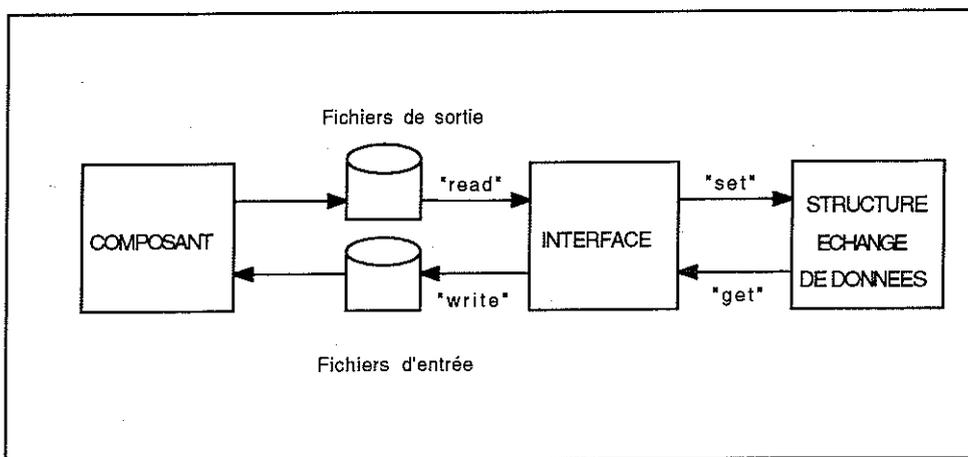


Fig. 9.10. Vue détaillée du schéma conceptuel de l'interfaçage entre un composant du système intégré et la structure d'échange de données

Les méthodes activées sont de type "set-value" pour modifier la valeur d'un attribut d'un objet et de type "get-value" pour obtenir une information sur la valeur d'un attribut. Cette façon de travailler permet d'obtenir une architecture répondant aux spécifications émises ci-dessus. Chaque composant requiert le développement d'un module d'interfaçage propre afin d'être intégré au système. Par analogie avec l'architecture des micro-ordinateurs et la liaison (software) requise pour établir la communication avec un périphérique, on parlera aussi de "driver" pour le module d'interfaçage associé à un logiciel connecté au système.

Pour des raisons de compatibilité avec la structure d'échange de données, les différents modules d'interfaçage ont été développés en Turbo-Pascal, ce qui facilite l'activation des méthodes associées aux objets de la structure centrale : cette dernière, implémentée comme une unité Pascal, est référencée par une clause "uses" dans chacune des unités implémentant les modules d'interfaçage. Les méthodes et les champs publics (ie non déclarés "Private") deviennent alors accessibles aux modules d'interfaçage. La suite de ce paragraphe va examiner les caractéristiques fonctionnelles principales des modules développés. Ces modules concernent essentiellement les logiciels utilisés dans les chapitres précédents et constituent autant d'exemples dont la philosophie peut être reprise telle quelle pour d'autres logiciels.

9.3.3.2. Interface pour la CAO

D'une manière générale, le développement d'un module d'interfaçage dépend du logiciel connecté et essentiellement de ses caractéristiques d'entrée/sortie. En effet, les logiciels connectés sont des produits commerciaux, le plus souvent, et il apparaît totalement exclu d'accéder à leurs mécanismes internes. Par conséquent, les fonctionnalités du module d'interfaçage dépendent du logiciel concerné.

A ce stade, il convient dès lors d'effectuer le choix d'un logiciel. En ce qui concerne la CAO, le choix s'est porté sur le produit "AutoCAD" (Autodesk, 1992) à cause de son caractère général, standard et de son application potentielle à des domaines autres que le bâtiment (le cas échéant, par l'intermédiaire de modules spécifiques). Un examen des possibilités de communication de AutoCAD révèle les faits suivants (Jones, 1989) :

- AutoCAD produit, pour chaque dessin, un fichier d'extension ".DWG" dont le format est une propriété de Autodesk et les spécifications restent secrètes. Par conséquent, il apparaît impossible d'utiliser ce format pour la communication
- AutoCAD offre la possibilité de traduire le fichier associé à un dessin (".DWG") en un autre fichier écrit dans un langage lisible, composé de texte ASCII. C'est le format (".DXF") qui tend d'ailleurs à devenir un standard en matière de transfert d'informations pour les systèmes de CAO fonctionnant sur micro-ordinateur. Un fichier ".DXF" comprend 5 sections :

- . Header : paramètres globaux
- . Tables : définition
- . Blocks : ensemble d'objets créés dans le dessin
- . Entities : les objets primitifs de AutoCAD
- . End of file : fin de fichier

Un fichier ".DXF" contient toute l'information associée à un dessin et son format est tout à fait documenté. Il constitue par conséquent la méthode privilégiée pour assurer le transfert d'information de et vers AutoCAD.

- Un fichier ".DXF" consomme généralement beaucoup d'espace-disque à cause du caractère exhaustif de l'information qu'il contient. AutoCAD procure deux alternatives en vue de réduire cet espace disque. Tout d'abord, il est possible de créer une version "binaire" du fichier, qui contient exactement la même information (".DXB") de manière compactée.
- Par ailleurs, AutoCAD permet de ne retenir qu'une partie des informations attachées à un dessin. Il s'agit de l'opération d'extraction des attributs ("Attribute Extraction") qui génère un fichier d'extension ".TXT" contenant uniquement les informations demandées et spécifiées dans un fichier "template" associé à l'opération d'extraction. Cette technique débouche sur une information très compacte, se présentant également sous une forme ASCII.

Pour des raisons de commodité, c'est la dernière possibilité d'interfaçage qui a été retenue. Elle impose toutefois une restriction : l'opération d'extraction des attributs porte, non sur les entités constitutives du dessin, mais sur des groupements d'entités, appelés "Blocks" et qui, outre une information directement liée à la géométrie du dessin, peuvent être affectés d'attributs supplémentaires, définis et quantifiés par l'utilisateur. De plus, les "blocks" sont définis avec des dimensions unitaires (1m x 1m x 1m) suivant les trois axes de coordonnées et peuvent être dilatés ou contractés en fonction des besoins du concepteur. L'utilisation de l'opération d'extraction des attributs impose dès lors que l'entièreté du dessin soit constituée de tels "blocks". Ceci ne pose toutefois pas de problème dans la mesure où une telle façon de travailler revient à construire un bâtiment à partir de modules prédéfinis, progressivement insérés dans le dessin et dilatés dans les 3 directions de l'espace, ainsi que le permet AutoCAD. Il suffit dès lors de disposer d'une librairie des composants les plus utilisés dans le domaine de la construction (parois à l'échelle 1 m x 1 m, portes, fenêtres, ...) et la construction d'un bâtiment se ramène à l'assemblage des modules prédéfinis. Au terme de la construction, l'opération d'extraction d'attributs transfère dans un fichier ASCII l'information demandée par l'utilisateur. La figure 9.11 représente schématiquement les opérations pour l'exemple de l'insertion de différents éléments (un mur extérieur, une fenêtre, un mur intérieur) dans le dessin et le transfert de l'information attachée à ces éléments vers un fichier ".TXT".

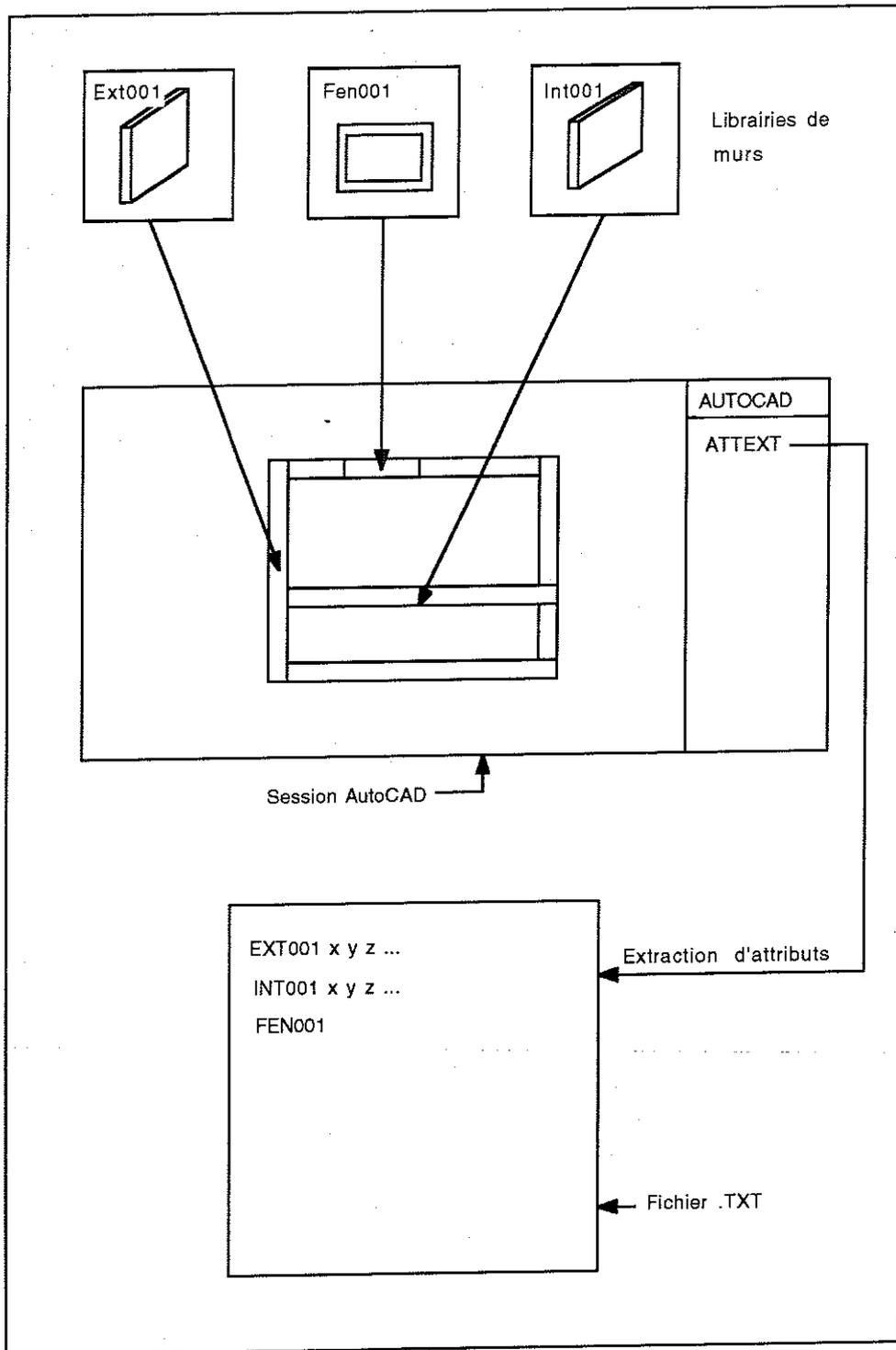


Fig. 9.11. Construction d'un bâtiment à partir de blocks et extraction des attributs vers un fichier ASCII

La simplicité de la stratégie utilisée entraîne une dépendance marquée vis-à-vis de l'application concernée. La nature des "blocks" et du fichier "template" apparaissent étroitement liées au problème abordé, dans ce cas-ci la conception de bâtiments. Le passage à une autre application implique la manipulation de "blocks" différents et la définition d'un nouveau fichier "template".

La méthode de transfert de l'information étant précisée, il convient maintenant de définir les spécifications du module d'interfaçage, c'est-à-dire la nature de l'information à communiquer. Elle dépend du sens de la communication.

AutoCAD → Structure centrale ("Postacad")

Dans cette direction, il apparaît évident de transférer d'abord l'information de type géométrique. L'opération d'extraction des attributs est capable, si l'utilisateur le souhaite, de transférer, pour chacun des "blocks" du dessin, l'information suivante (Couwenbergh, 1990).

- le niveau d'imbrication du bloc ("LEVEL")
- le nom du bloc ("NAME")
- la coordonnée x d'insertion du bloc ("X")
- la coordonnée y d'insertion du bloc ("Y")
- la coordonnée z d'insertion du bloc ("Z")
- le compteur du bloc ("NUMBER")
- l'indicateur du bloc ("HANDLE")
- le nom de la couche contenant le bloc ("LAYER")
- l'angle de rotation du bloc ("ORIENT")
- le facteur d'échelle x du bloc ("XSCALE")
- le facteur d'échelle y du bloc ("YSCALE")
- le facteur d'échelle z du bloc ("ZSCALE")
- l'extrusion du bloc en x ("XEXTRUDE")
- l'extrusion du bloc en y ("YEXTRUDE")
- l'extrusion du bloc en z ("ZEXTRUDE")
- les attributs définis par l'utilisateur au moment de la création des blocs (par exemple nombre de couches, matériaux, épaisseur des couches).

En fonction des objectifs de l'intégration, l'information suivante a été retenue : NAME, X, Y, Z, ORIENT, XSCALE, YSCALE, ZSCALE, XEXTRUDE, YEXTRUDE, ZEXTRUDE, nombre de couches, matériaux utilisés, épaisseur de chaque couche.

A partir de cette information, le module d'interfaçage de AutoCAD instancie les objets de classe "wall", "window", "door", "layer", "material", "wall type", "orientation", "room" et quantifie tous les attributs dont la valeur est connue, entre autres toutes les relations qui unissent les différents objets créés. La figure 9.12 représente schématiquement l'ensemble des opérations. Associée à la figure 9.11, elle dépeint le processus complet de dessin dans AutoCAD et le transfert d'information vers la structure d'échange de données.

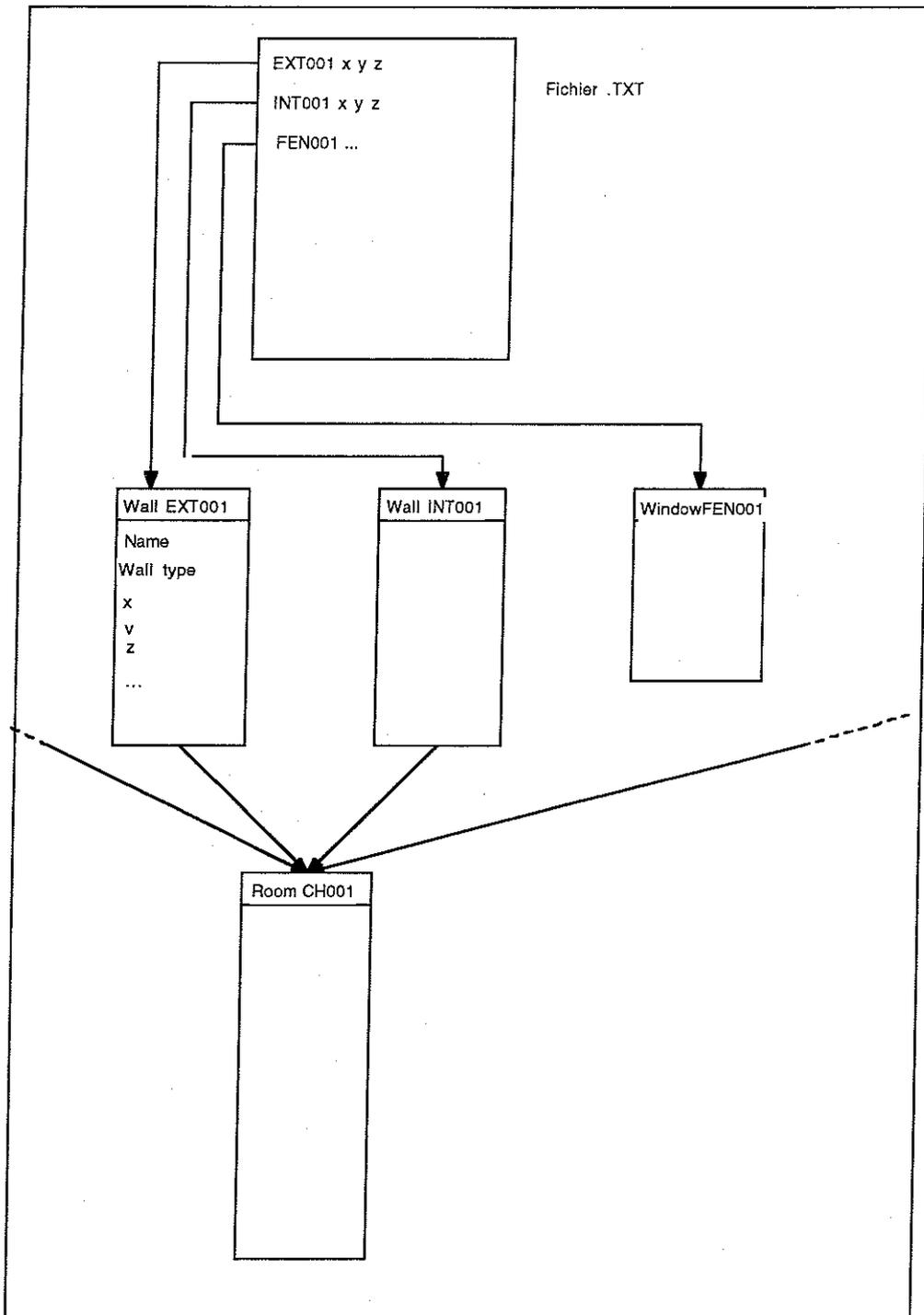


Fig. 9.12. Création des objets à partir du fichier ASCII issu de l'opération d'extraction des attributs

Structure centrale → AutoCAD (Prepacad")

L'établissement de la communication dans l'autre sens pose un problème dans la mesure où l'opération d'extraction des attributs n'est pas réversible : il n'est pas possible de réintroduire la valeur des attributs dans les blocs de AutoCAD. La seule façon de procéder consiste à "remonter" au format ".DXF" qui, lui, permet la communication dans les deux sens par les opérations "DXFIN" et "DXFOUT" (lecture et écriture de fichier DXF). Quoique la faisabilité de cette approche ne soit pas contestée, cette méthode n'a pas été mise en oeuvre dans le cadre de travail.

L'utilisation de ce module doit en effet se situer dans la perspective globale du travail avec le logiciel intégré. Il s'agit d'un travail de conception, ce qui signifie que le module de CAO constituera le plus souvent le point de départ du projet. A ce stade, la structure des données centrales sera vide de tous objets, ce qui justifie le caractère prioritaire accordé au module de communication "AutoCAD→ Structure Centrale" et le caractère secondaire du module inverse. Il est important à cet égard de se souvenir des spécifications sur l'architecture du logiciel (9.2.1), notamment du souhait de laisser à l'utilisateur le contrôle du processus de décision (système d'aide à la décision).

9.3.3.3. Interface pour la simulation

L'expérience acquise dans le cadre de ce travail, et d'ailleurs largement détaillée au chapitre 5 (simulation), a surtout concerné l'utilisation des logiciels de simulation du comportement thermique de bâtiments. Par conséquent, la démarche d'intégration proposée dans ce chapitre s'est surtout penchée sur le problème de l'interfaçage de la structure centrale avec de tels logiciels, étant entendu qu'une approche similaire peut être mise en oeuvre pour d'autres catégories de logiciels de calcul (analyse structurelle, acoustique, coût, éclairage).

Afin de poursuivre la logique envisagée précédemment, la première tentative d'intégration a concerné le logiciel MBDSA (voir chapitre 5). Ce dernier a permis de jeter les bases d'une approche qui a pu être requise, pratiquement telle quelle, pour les programmes Suncode et TRNSYS (également décrits au chapitre 5).

Comme pour le CAO, la démarche d'intégration a d'abord examiné les possibilités de communication de MBDSA avec le monde extérieur par l'intermédiaire de ses fichiers d'entrée / sortie. Le programme MBDSA est constitué de 4 modules qui chacun, requièrent un certain nombre de fichiers d'entrée. Certains de ces fichiers sont produits par un module d'exécution préalable, d'autres doivent être produits par l'utilisateur (figure 9.13).

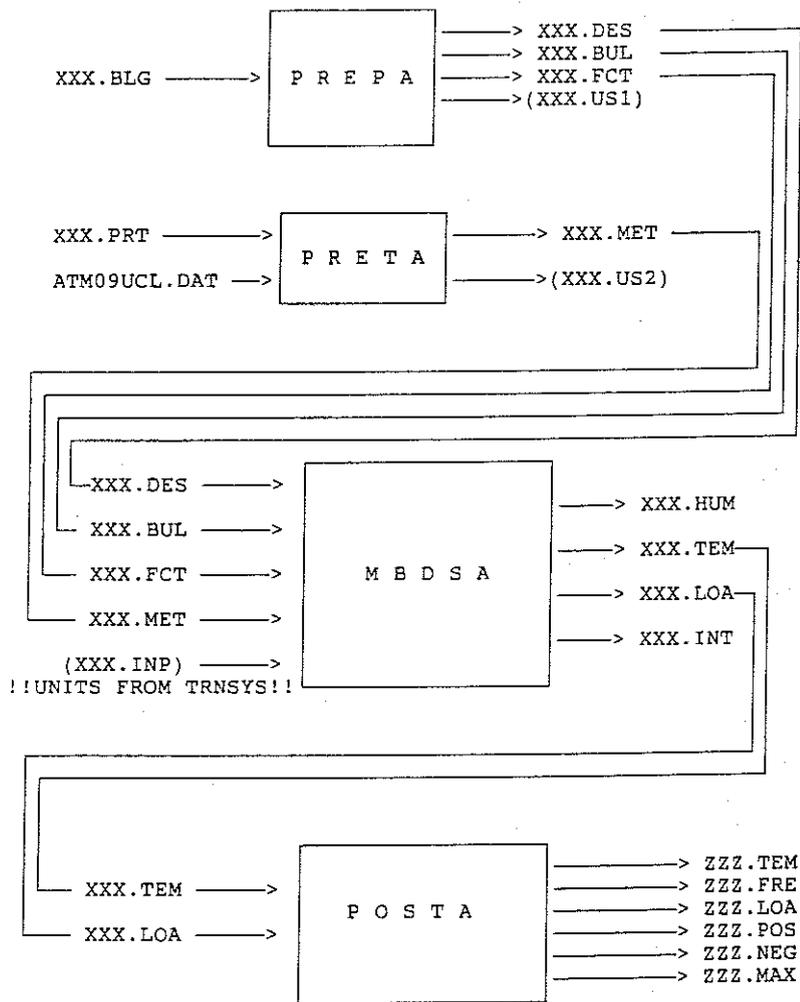


Fig. 4 Simulation procedure

Fig. 9.13. Transit des fichiers lors d'une procédure de simulation au moyen de MBDSA

Si l'on considère les 4 modules du logiciel d'entrée de façon globalisée, on remarque qu'ils exigent les fichiers suivants :

- un fichier de description du bâtiment (.BLG)
- un fichier de description de l'environnement météorologique (.PRT)
- un fichier de données météorologique (.DAT)
- un fichier de paramètres pour la simulation, non représenté sur la figure (.SIM)

Dans l'autre direction, MBDSA produit un certain nombre de fichiers contenant les résultats de la simulation. Cet examen va permettre de générer les spécifications fonctionnelles du module d'interface.

Structure centrale → MBDSA ("PREPMBDSA")

Dans cette direction, la fonction principale du module d'interface est d'assurer la constitution des fichiers d'entrée de MBDSA à partir de l'information contenue dans la structure centrale. Cette information provient, par exemple, de celle déposée par le logiciel de CAO et/ou par un système de gestion de bases des données (voir 9.3.3.4.). Examinons le travail effectué dans la version actuelle du module.

Tout d'abord, PREPMBDSA crée un objet de classe "simulation" et l'initialise avec certains paramètres donnés par l'utilisateur (nom, date de début, date de fin). Ensuite, le module crée le fichier d'entrée du module "PREPA" à savoir le fichier de description du bâtiment (.BLG) et y écrit les informations relatives aux "Properties", "Layers", "Walls", "Windows" qui sont disponibles dans la structure centrale. PREPMBDSA crée alors un certain nombre d'objets propres à la simulation thermique; ces objets appartiennent aux classes "infiltration", "gains internes", "zones thermiques", "chauffage", "refroidissement", "ventilation". Dans la version actuelle, les attributs de ces objets reçoivent des valeurs par défaut. Ensuite, la constitution des fichiers de description du bâtiment est poursuivie par l'introduction des informations relatives aux "Gains", "Infiltrations", "Ventilations", "Heating", "Cooling", "Orientations" et "Zones". Ensuite, tous ces éléments constitutifs du bâtiment sont assemblés entre eux dans la partie du fichier réservée au "Building". La procédure se termine par la création d'objets de classe "output" et "input" correspondant aux variables d'entrée (par défaut les variables météorologiques) et de sortie (par défaut la température, les charges de chauffage, de refroidissement et de ventilation, les gains solaires, dans chaque zone) du programme. Toutes les relations entre ces objets sont également instanciées à ce stade de la procédure. L'information relative aux "output" est alors transmise au fichier de description du bâtiment, ce qui le clôture.

Ensuite, PREPMBDSA passe à la création du fichier d'entrée pour le module PRETA, à savoir le fichier ".PRT" qui contient une série d'informations permettant de réaliser un traitement météorologique : type de données solaires, coordonnées du site, albedo du sol, période de simulation, description des azimuts caractérisant l'enveloppe du bâtiment. Pour ce faire, PREPMBDSA utilise l'information contenue dans la structure centrale et, éventuellement, certaines valeurs par défaut. Après le fichier ".PRT", le fichier de données météorologiques (.DAT) est également préparé en fonction de l'information relative au site du bâtiment (la station météorologique disponible la plus proche est utilisée automatiquement) et à la période demandée pour la simulation.

Enfin, PREPMBDSA clôture son travail par la création du fichier d'entrée pour le module MBDSA, à savoir le fichier ".SIM". Il utilise pour cela l'information contenue dans la structure centrale et relative à la classe "simulation".

MBDSA → STRUCTURE CENTRALE ("POSTMBDSA")

En fonctionnement inverse, le module POSTMBDSA réalise une lecture des fichiers d'entrée de MBDSA et met à jour la structure de données centrale, chaque fois que l'occurrence d'une nouvelle instance d'une classe (= nouvel objet) est détectée. Ce module est actuellement en cours de développement. Le transfert de données en sens inverse apparaît en effet moins prioritaire que l'opération Structure centrale → MBDSA dans la mesure où le déroulement usuel d'une session de travail envisagera l'évaluation par une technique de simulation d'un design élaboré dans le logiciel de CAO et non l'élaboration d'un design à partir du résultat d'une simulation numérique.

L'exercice réalisé ci-dessus pour le logiciel MBDSA constitue un exemple de démarche à suivre pour connecter un logiciel de simulation à la base de données centrale. La même procédure a été appliquée à deux confrères de MBDSA : Suncode et TRNSYS. Pour ce dernier, il convient de préciser que l'implémentation a seulement considéré une architecture minimale de modules TRNSYS, à savoir un module de lecture de fichiers (Type 9, "DATA READER"), un module de simulation de bâtiment (Type 56, "MULTIZONE BUILDING"), des modules d'impression des résultats (Type 25, "PRINTER"). Les drivers PREPSUNCODE, POSTSUNCODE, PREPTRNSYS et POSTTRNSYS ont été développés en suivant une procédure en tout point similaire à celle adoptée pour PREPMBDSA et POSTMBDSA. Par conséquent, il ne sera pas donné de précisions supplémentaires à ce sujet.

Pour revenir au cas du logiciel TRNSYS, le nombre et la diversité des modules disponibles pour ce logiciel génère la possibilité d'étendre considérablement le spectre des objets manipulés par le logiciel intégré. Il conviendrait à cette fin de développer les modules PREPTRNSYS et POSTTRNSYS de façon à prendre ces nouveaux objets en compte. Dans l'optique de généralisation de logiciel, la solution TRNSYS constitue probablement la voie la plus souple et la plus apte à embrasser un grand nombre d'applications.

9.3.3.4. Interface pour le système de gestion de base de données

Le chapitre 6 a montré l'intérêt, dans la prise en charge d'un problème environnemental, de disposer de l'accès à des bases de données. Par conséquent, l'intégration d'un système de gestion de bases de données dans le système mis en oeuvre s'avère essentielle. Dans le cadre de ce travail, il a été fait usage du système "BMW", décrit ci-dessus (chapitre 6), qui, pour élémentaire qu'il paraisse, n'en pose pas moins tous les problèmes d'interfaçage potentiels. Une démarche en tous points similaire peut être envisagée pour d'autres SGBD plus classiques tels que DBASE IV ou Filemaker Pro par exemple.

Comme précédemment, une première approche du problème doit examiner les possibilités de communication du système de gestion avec le monde extérieur. BMW fonctionne normalement de façon interactive : l'utilisateur entre ses desiderata au clavier et reçoit les informations sur écran. Il est toutefois possible de travailler à partir d'un fichier d'entrée (fichier de requêtes) et de recueillir les résultats dans un fichier de sortie (fichier de réponses). C'est sur base de ce constat que le développement du module d'interfaçage a eu lieu.

Structure centrale → BMW ("Prepbmw")

Le module d'interfaçage crée, à partir des objets présents dans la structure centrale, un fichier de requêtes (".REQ") qui spécifie le nom de la base de données à consulter et l'opération à y effectuer (recherche sur base d'une clé donnée par exemple).

BMW → Structure centrale ("Postbmw")

Le module inverse lit les résultats de la recherche dans le fichier de réponses (".REC") et les renvoie dans la structure centrale, ces résultats contiennent les enregistrements recherchés et la valeur des champs correspondant aux attributs inconnus au moment de la requête. La structure centrale est alors mise à jour avec ces valeurs.

La figure 9.14 illustre les deux opérations pour la recherche des champs "conductivity", "density" et "capacity" à partir du champ "name".

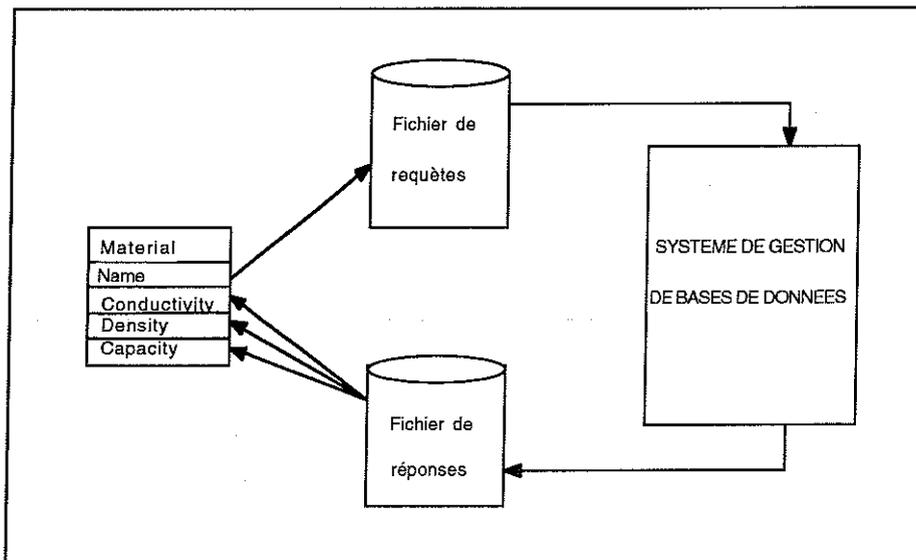


Fig. 9.14. Communication entre la structure centrale et un système de gestion de bases de données

9.3.3.5. Interface pour le système expert

Dans la version actuelle du système, l'interfaçage a été réalisé avec un système expert rudimentaire ("EXPERT"), développé spécifiquement pour ce travail afin de tester la faisabilité de l'approche. Ce système expert, développé en Turbo-Pascal, dispose d'un moteur d'inférence travaillant en chaînage avant sur des règles de type IF ... THEN ... ELSE. Le caractère élémentaire de l'approche permet toutefois de rencontrer les problèmes essentiels qui risquent de survenir lors de l'interfaçage d'un logiciel de ce type. Entre autres, la connexion à un générateur de systèmes experts ("shell") tel que Level V (Information Builders) peut se réaliser suivant les mêmes principes.

La connexion d'un système expert en tant que module d'évaluation "périphérique" engendre des difficultés comparables à celles rencontrées pour l'interfaçage d'une base de données. Le problème essentiel réside dans le fait de traduire le contenu de la structure centrale dans le langage du système expert. Pour ce faire, chaque classe de la structure centrale est nantie d'une méthode réalisant une interprétation sémantique, dans une syntaxe donnée, de son contenu. Il revient au développeur de la base de connaissances d'utiliser la même sémantique et la même syntaxe pour élaborer les règles, ce qui permettra au moteur d'inférence de comparer faits et prémices des règles (fig. 9.15).

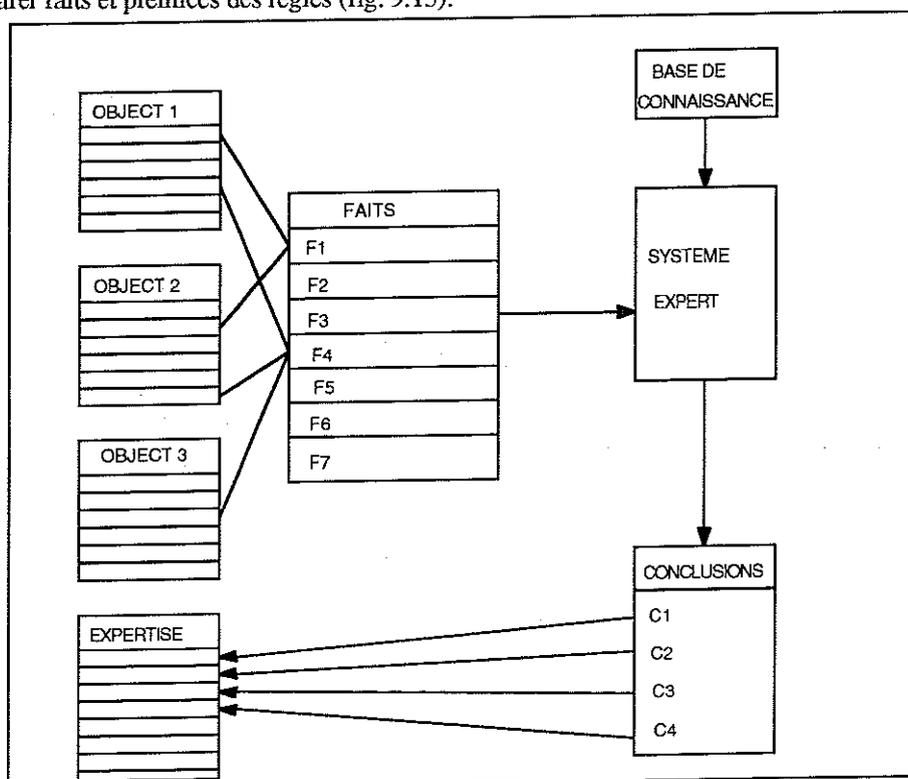


Fig. 9.15. Communication entre la structure centrale et un système expert par l'intermédiaire d'un fichier de faits et d'un fichier de conclusions.

Structure centrale → EXPERT ("Prepexpert")

Le module PREPEXPART traduit le contenu de la structure centrale et génère un fichier de faits qui servira de contexte de travail au système expert.

EXPERT → Structure centrale ("Postexpert")

Dans sa version actuelle, le module POSTEXPART, crée des objets de classe "expertise" dans lesquels sont retranscrites les conclusions de l'inférence réalisée par le système expert sous forme de messages.

9.3.3.6. Synthèse

Les paragraphes précédents ont montré la méthodologie, assez similaire d'ailleurs, utilisée pour développer les modules d'interfaçage pour les 4 catégories de logiciels envisagées dans le cadre de l'intégration. L'idée maîtresse exprime la totale indépendance d'un tel module par rapport à un autre : un module d'interfaçage ne dépend que des caractéristiques (essentiellement des méthodes) de la structure de données centrale et du logiciel à interfacier, ce qui rend le logiciel intégré extensible et rétractable à souhait.

Si les développements relatés ont cerné un choix bien déterminé de logiciels, il est évident que la même démarche peut s'appliquer à tout autre programme émergeant aux mêmes catégories, pour autant que des possibilités de communications suffisantes existent avec le monde extérieur.

Entre autres, il apparaît évident que le problème de la conception (environnementale) d'un bâtiment ne peut se satisfaire de la seule évaluation du point de vue énergétique ou thermique. D'autres évaluations se doivent de prendre place en utilisant des outils adaptés: évaluation de la résistance de la structure par un logiciel d'analyse structurelle, évaluation de la qualité de l'éclairage naturel par un programme de calcul spécifique, évaluation de la qualité acoustique par un logiciel de bruit, évaluation du coût du projet par un calcul économique. Néanmoins, le principe de l'utilisation de ces outils apparaît identique à celui adopté pour la connexion de logiciels de simulation thermique et les développements afférents n'apportent rien de plus à la méthodologie présentée dans ce texte. La seule complication réellement introduite par une évaluation "multi-logiciels" d'un projet réside dans l'émergence potentielle accrue de conflits entre les solutions proposées. Ceci justifie l'octroi d'une attention particulière dans le paragraphe suivant au problème de l'arbitrage de ces conflits.

9.3.4. Développement du module d'arbitrage

9.3.4.1. Généralités

L'association de différents intervenants au sein d'un logiciel intégré présente le risque d'engendrer à tout moment, des conflits entre les acteurs du problème. Par exemple, l'optimisation du comportement thermique d'un bâtiment peut se faire au détriment de la qualité de l'éclairage naturel ou du coût qui en résulte. Ou encore, un système expert réalisant une évaluation "légale" du projet en regard des règlements de l'Urbanisme peut entrer en conflit avec la pensée créatrice du concepteur. De ce constat résulte la nécessité de disposer, au sein d'un système réellement intégré, d'un mécanisme réalisant un arbitrage entre différentes alternatives d'un même projet et fondé sur des techniques éprouvées.

Dans ce travail, la mise au point de cette procédure d'arbitrage a procédé en deux étapes. Tout d'abord, la structure d'échange de données, représentant l'état du projet à un instant bien précis de la démarche de conception, a été développée de manière à supporter, tout au long du processus, plusieurs versions de ce même projet. Ces versions (ou alternatives) peuvent très bien ne différer que par un nombre restreint de caractéristiques et mettre en jeu les mêmes objets nantis de propriétés relationnelles légèrement modifiées. Elles peuvent aussi représenter deux solutions diamétralement opposées et mobiliser dès lors deux ensembles d'objets bien distincts. Ensuite, un module spécial, travaillant au même niveau que les différents modules d'interfaçage, a été mis au point. Le module renferme des techniques de calcul issues de l'analyse multicritère et apparaît capable de poser un diagnostic d'évaluation global (prenant en compte une série non limitative de critères) du projet en cours. Ces techniques sont détaillées ci-dessous.

9.3.4.2. Fondements de l'analyse multicritère

L'analyse multicritère constitue une technique mathématique permettant d'aborder et de résoudre des problèmes d'optimisation mettant en jeu plusieurs critères. De ce fait, elle diffère substantiellement des méthodes d'optimisation classiques, mono-critère, dans la mesure où la solution d'un problème à plusieurs critères ne constitue plus un optimum mais plutôt un "satisfactum", c'est-à-dire une solution qui permet de satisfaire, à moindre mal, l'ensemble des critères du problème.

Le caractère pluridisciplinaire des problèmes environnementaux engendre la nécessité d'évaluer les solutions par rapport à un ensemble de critères. Il n'est dès lors pas étonnant de constater que les principales applications de ces techniques ont concerné, jusqu'à présent, des problèmes de gestion de l'environnement. Simes (1990) présente une approche globale de la question, accompagnée de quelques exemples dans le contexte suisse. Une approche des

techniques mathématiques disponibles pour résoudre le problème apparaît dans Goicoechea et al (1992). Les applications spécifiques relatives au problème de la conception de bâtiments demeurent rares. Redford et Gero (1980) proposent toutefois une telle approche dans le contexte australien. Dans leur étude, deux critères, le facteur d'éclairage naturel dans un local déterminé et la température maximale observée au plus fort de l'été, servent à évaluer les courbes optimales de Pareto, c'est-à-dire la "classe de solutions pour lesquelles la performance vis-à-vis d'un critère est meilleure que celle de toute autre solution pour laquelle la performance vis-à-vis de l'autre critère est aussi bonne ou meilleure".

En en restant délibérément à un niveau élémentaire, l'analyse multicritère se fonde sur les notions suivantes :

- les objectifs attachés à un projet
- les critères qui traduisent la satisfaction d'un objectif donné et peuvent constituer un indice de performance ou un indice de ressource du système
- les fonctions de valeur et d'utilité permettent de standardiser la valeur d'un critère dans une échelle cardinale évoluant entre 0 et 1
- les alternatives qui constituent les différentes solutions d'un projet, entre lesquelles il faut choisir le satisfactum.

La technique de résolution la plus élémentaire associe à chaque critère une fonction de valeur qui normalise ce critère (qui peut s'exprimer à l'origine dans une échelle ordinale) dans la gamme 0-1. De plus chaque critère est affecté d'un coefficient de pondération. Pour chaque alternative du projet, on évalue cette fonction de valeur pour chacun des critères définis. Ceci conduit à un tableau à deux entrées (tableau 9.2).

Alternative Critères	A ₁		A _j		A _N
C ₁	z ₁₁		z _{1j}		z _{1N}
C _i	z _{i1}		z _{ij}		z _{iN}
C _I	z _{I1}		z _{Ij}		z _{IN}

Tableau 9.2. Fonction de valeur pour I critères et N alternatives

Dans ce tableau, z_{ij} représente la valeur de la fonction de valeur du critère i pour l'alternative j. On calcule alors les valeurs minimale et maximale de cette fonction de valeur pour chacun des critères :

$$z_i^* = \max\{z_{ij}, j = 1, N\} \quad (9.1)$$

$$z_{i*} = \min(\{z_{ij}\}, j = 1, N) \quad (9.2)$$

Enfin, pour chaque alternative, on calcule la valeur de l'indice multicritère :

$$I_p(j) = \left[\sum_{i=1}^I w_i^p \left(\frac{z_i^* - z_{ij}}{z_i^* - z_{i*}} \right)^p \right]^{1/p} \quad (9.3)$$

- où w_i représente le coefficient de pondération attaché au critère i
 p détermine le type de méthode. Pratiquement, p peut prendre 3 valeurs :
- | | |
|-------------------------------------|------------------------|
| $p = 1$: programmation linéaire | (distance l_1) |
| $p = 2$: programmation quadratique | (distance l_2) |
| $p \rightarrow \infty$ | (distance l_∞) |

La solution du problème est donnée par l'alternative dont la valeur, calculée par l'une des 3 distances (9.3) se rapproche le plus de zéro, ce qui signifie la plus grande proximité par rapport à la solution idéale. Le choix des w_i et de p permet de moduler l'importance relative des différents critères.

Cette méthode constitue le "compromise programming" et a été retenue dans la suite de ce travail.

9.3.4.3. Implémentation

L'implémentation de cette méthode, basée sur le concept de support de versions multiples (voir 9.3.4.1.) s'est réalisée en définissant, dans la structure d'échange de données, une classe d'objet de type "critère" dont les instances, créées au début du travail sur un projet, permettent d'évaluer le projet. Les critères sont intimement reliés aux outils disponibles pour les évaluer : logiciels de simulation et/ou systèmes experts. Chaque critère est doté d'une fonction de valeur et d'une fonction d'utilité, définies a priori mais éventuellement modifiables en cours de projet. A titre d'exemple, un problème de conception de bâtiments pourra être évalué au moyen des critères suivants :

- un critère énergétique portant par exemple sur la consommation annuelle, évalué au moyen de MBDSA.
- un critère de confort portant par exemple sur le nombre d'heures de surchauffe, évalué également au moyen du logiciel MBDSA.
- un critère de légalité, évalué au moyen d'un système expert vérifiant la conformité aux réglementations de l'Urbanisme.
- un critère économique, évalué au moyen d'un logiciel d'évaluation des coûts.
- ...

La figure 9.16 représente des possibilités de fonction de valeur pour ces différents critères. A tout instant de la conception d'un projet, les différents critères peuvent être évalués et, à partir de leur valeur individuelle, les indices multicritères donnés par (9.3) peuvent être calculés. Le résultat global fournit alors une évaluation comparative des différentes versions du projet.

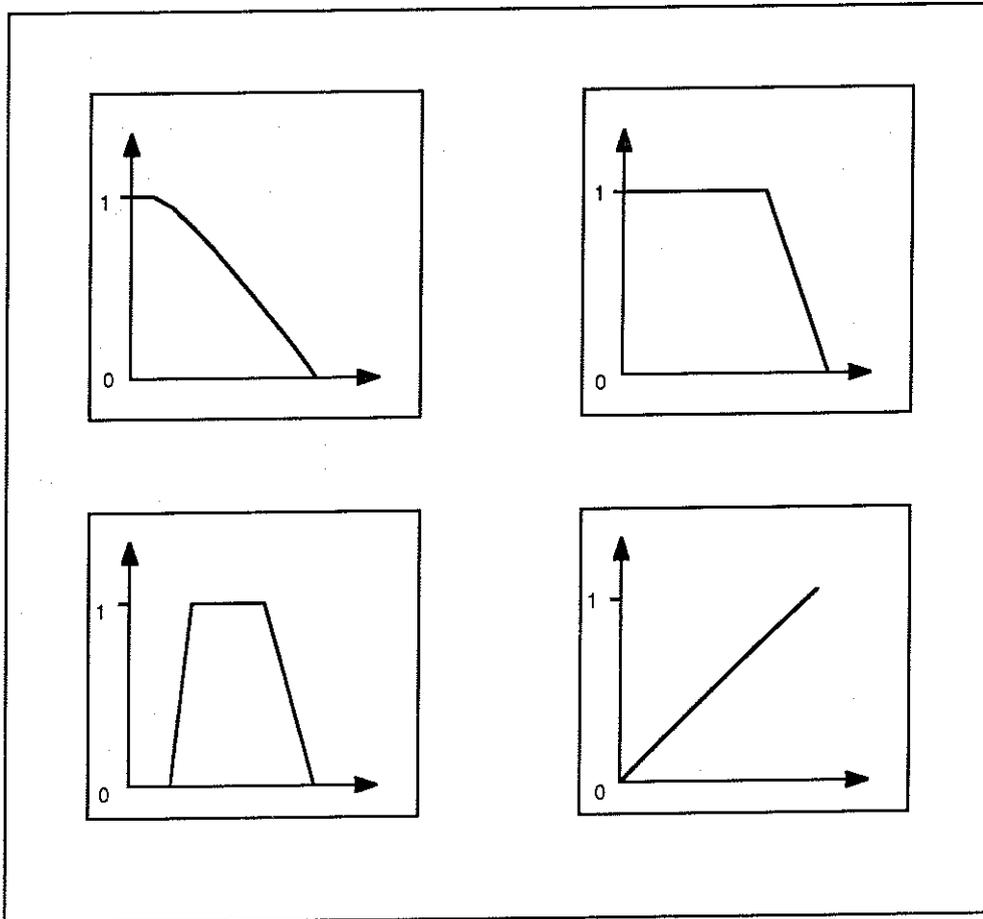


Fig. 9.16. Fonction de valeur pour 4 critères d'évaluation de bâtiment
a) Energie b) Inconfort c) Légalité d) Economie

9.3.5. Développement de l'interface-utilisateur

Lors du développement d'un logiciel intégré, les exigences de convivialité engendrent la nécessité d'adjoindre au système une interface-utilisateur performante. Ce problème n'échappe plus à aucun concepteur de logiciel, à tel point que des logiciels générateurs d'interface-utilisateur deviennent disponibles avec la conséquence que nombre de produits commerciaux (dans un premier temps sur Mac Intosh, ensuite dans les mondes PC et Unix) produisent exactement le même "Look and Feel" pour avoir utilisé le même générateur d'interface.

Le logiciel développé dans le cadre de ce travail échappe un peu à la règle générale dans la mesure où il a été doté d'une interface "maison" spécifiquement développée et d'ailleurs déjà en partie disponible avec le premier prototype IBDS (voir 9.3.1).

Afin de satisfaire les exigences de généralisation du logiciel, cette interface se devait d'être suffisamment souple et configurable par l'utilisateur. Elle se présente sous la forme d'une double combinaison de menus horizontaux et de menus verticaux, accessibles par un processeur de balayage commandé par le clavier. Il est évident que l'adjonction d'une commande à partir de la souris entre prioritairement dans les spécifications d'une version "diffusable" de ce logiciel mais, ce problème, de nature exclusivement informatique, n'a pas retenu outre mesure notre attention. Le balayage de chaque option des menus horizontaux et verticaux s'accompagne de l'affichage d'un message indiquant l'action déclenchée par le choix de cette option. Enfin, l'interface met régulièrement à jour des informations générales relatives au projet : nom du projet, de la version en cours, du site; affichage de la date et de l'heure.

Jusqu'ici, cette interface ne présente rien d'exceptionnel ni de résolument original. Sa caractéristique la plus importante réside certainement dans l'aspect "intelligent" qui lui a été conféré par son association à des systèmes experts. En effet, l'utilisateur peut choisir d'être secondé par un certain nombre d'assistants qui se présentent sous la forme de systèmes experts et qui s'activent à chaque modification du projet, afin de réaliser l'un des tâches suivantes :

- Suggérer des solutions en fonction de l'information disponible.
- Réaliser des tests au sujet du caractère consistant et valide du projet.
- Exécuter un certain nombre de "tâches de fond", comme la consultation d'une base de données ou la réalisation d'une expertise.

Le choix des systèmes experts (plus exactement des bases de connaissances) "montés" au niveau de l'interface-utilisateur reste du ressort de l'utilisateur qui dispose de toute la liberté nécessaire pour travailler librement ou, au contraire, pour être entouré des assistants souhaités.

Une vue globale de l'interface-utilisateur est donnée à la figure 9.17. Sur cette figure, la colonne de gauche représente schématiquement les cinq systèmes experts disponibles pour l'utilisateur: énergie ("Ene"), éclairage ("Lig"), bruit ("Noi"), réglementation ("Law"), gestionnaire ("Mgr"). Tous ces systèmes sont pour l'instant nantis d'un ensemble limité de règles, déclenchant l'affichage de messages pendant la session de travail, messages qui peuvent être du type:

"Pour le site de X, des vitrages doubles à basse émissivité sont recommandés".

Le système expert "gestionnaire" a pour mission de consulter automatiquement les bases de données disponibles (matériau, site) pendant l'exécution du projet.

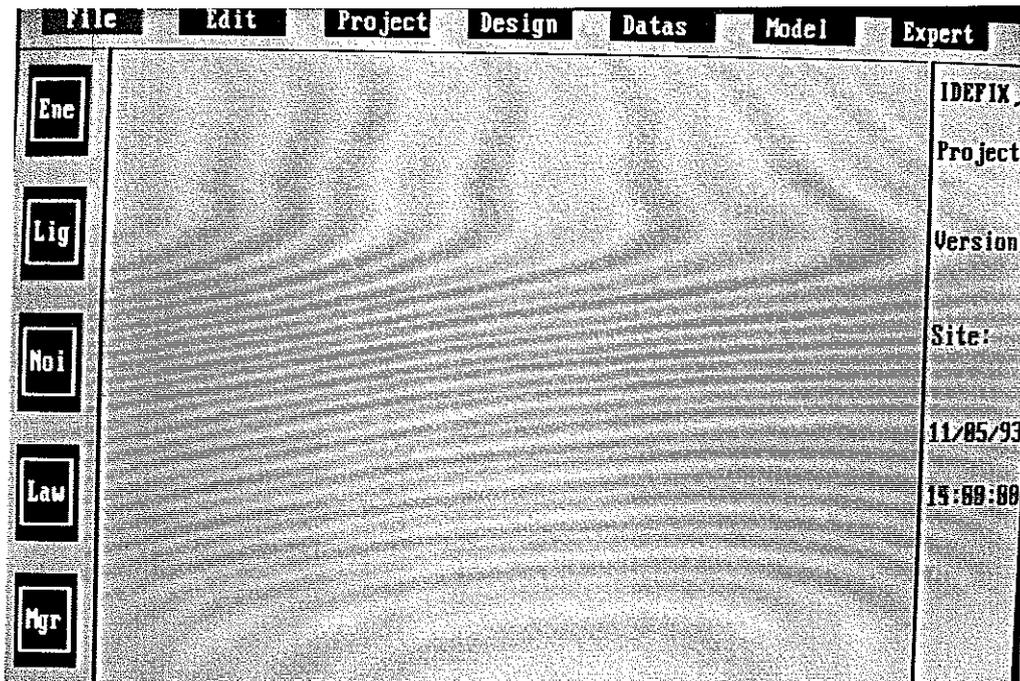


Fig. 9.17. Vue de l'interface-utilisateur

9.3.6. Développement d'une procédure de co-résidence de logiciels

Les spécifications relatives à la plate-forme de développement souhaitée entraînent des difficultés lors de l'implémentation du concept de système intégré. En effet, celui-ci, par définition, met en jeu, plusieurs logiciels, qui, au vu de l'évolution actuelle, peuvent se montrer relativement gourmands en mémoire centrale.

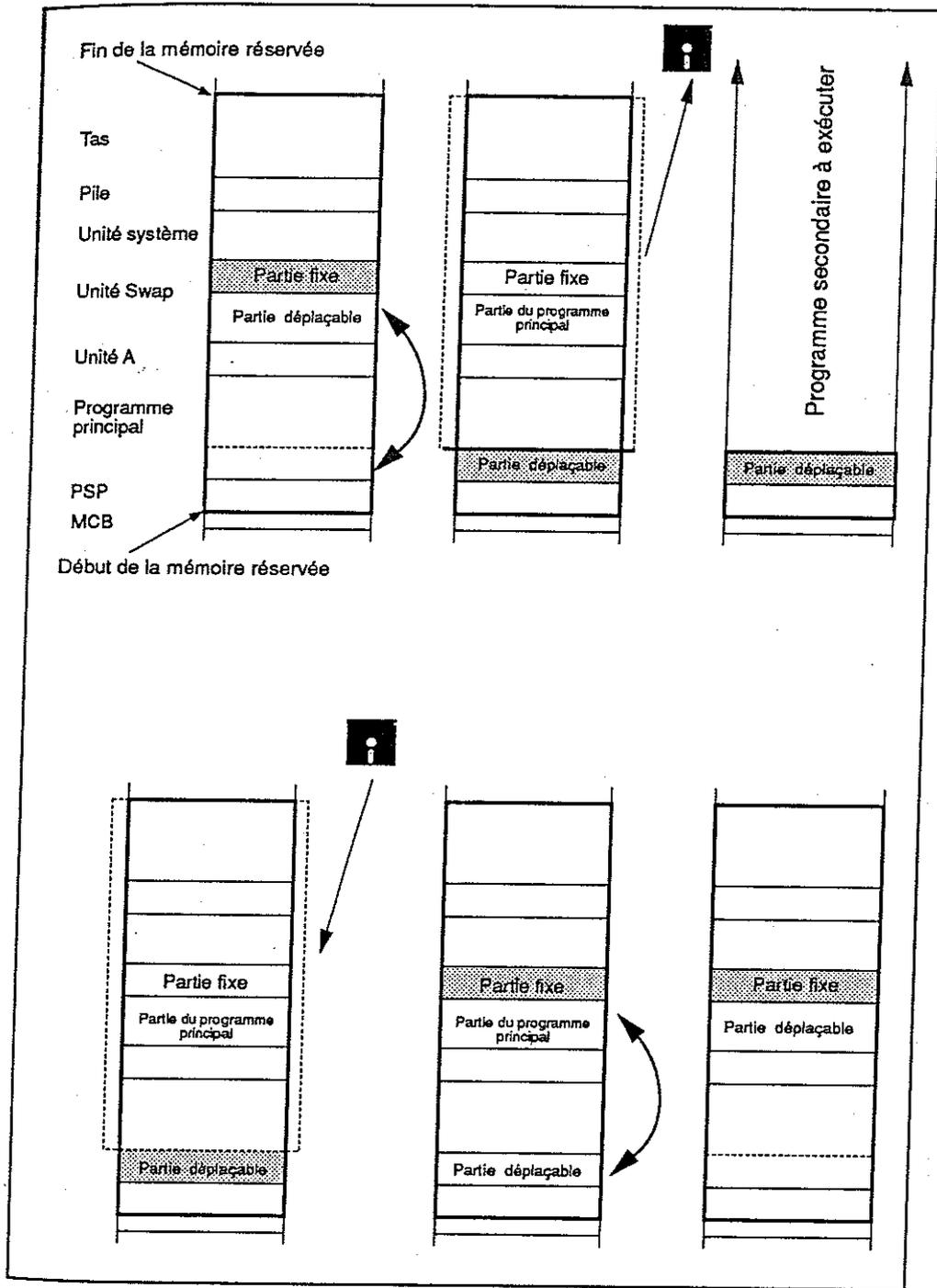


Fig. 9.18. Principe de fonctionnement de l'unité "Swap" d'échange de logiciels (Extrait de Tischer (1990))

FD 2011

Le logiciel intégrateur lui-même n'échappe pas à cette règle. De plus, le mécanisme d'intégration sous-entend la possibilité de passer d'un logiciel à l'autre, entre autres de passer du logiciel intégrateur à ses composantes périphériques. Le problème devient particulièrement aigu dans le cas d'une implémentation sous DOS.

Le problème a été résolu par l'utilisation d'une procédure d'échange de logiciels, développée par Tischer (1990). Cette procédure ("Swap"), écrite en Turbo-Pascal, permet à un programme, également écrit en Turbo-Pascal, (le programme "appelant") de lancer l'exécution d'un autre programme (un exécutable DOS, le programme "appelé") puis de revenir au programme appelant, après exécution du programme appelé. Pour ce faire, le programme appelant est temporairement transféré en mémoire étendue, sur un disque dur ou virtuel, afin de libérer la quasi totalité de la mémoire DOS disponible. Après exécution du programme appelé, le transfert inverse replace le programme appelant à sa place originelle, dans un contexte (pointeurs, variables, ...) identique à celui qui existait au moment de l'appel du programme appelé. La figure 9.18 illustre le fonctionnement de l'unité "Swap" qui fait partie intégrante du système proposé.

9.3.7. Synthèse : le logiciel IDEFIX

Les différentes composantes du logiciel intégré ayant été présentées tour à tour, il reste maintenant à les assembler en suivant la technique présentée en 9.3.1. La structure centrale, comme son nom l'indique, est placée au centre du système. Les différents intervenants y sont connectés par l'intermédiaire de leur module d'interfaçage. Ensuite, le logiciel intégré est doté d'un module d'arbitrage qui implémente l'analyse multicritère et joue le rôle de "tampon" entre la structure centrale et les intervenants. Enfin, l'ensemble de la structure est entourée de l'interface-utilisateur. La figure 9.19 représente l'architecture conceptuelle du système qui reçoit par ailleurs le nom de :

"IDEFIX"

"Intelligent Decision-making in Environment Featuring the Integration of CRoss ressources".

Ce logiciel constitue la solution proposée au problème d'intégration posé en 9.2.

Du point de vue de l'utilisateur, le logiciel IDEFIX apparaît constitué de 7 modules.

- 1 module par catégorie d'intervenant à savoir
 - 1 module "Infographie" ("Design")
 - 1 module "Bases de données" ("Datas")

- 1 module "Simulation" ("Models")
 - 1 module "Système expert" ("Expert")
- 1 module de gestion du projet contenant des procédures générales de gestion du projet en cours (initialisation, nouvelle version, retour vers une version antérieure, visualisation du contenu de la structure centrale, lecture/écriture du projet), mais également la procédure d'évaluation multicritère présentée ci-dessus
- deux modules "utilitaires" ont été adjoints au système : 1 gestionnaire de fichiers ("FILE") et un éditeur de texte ("EDIT").

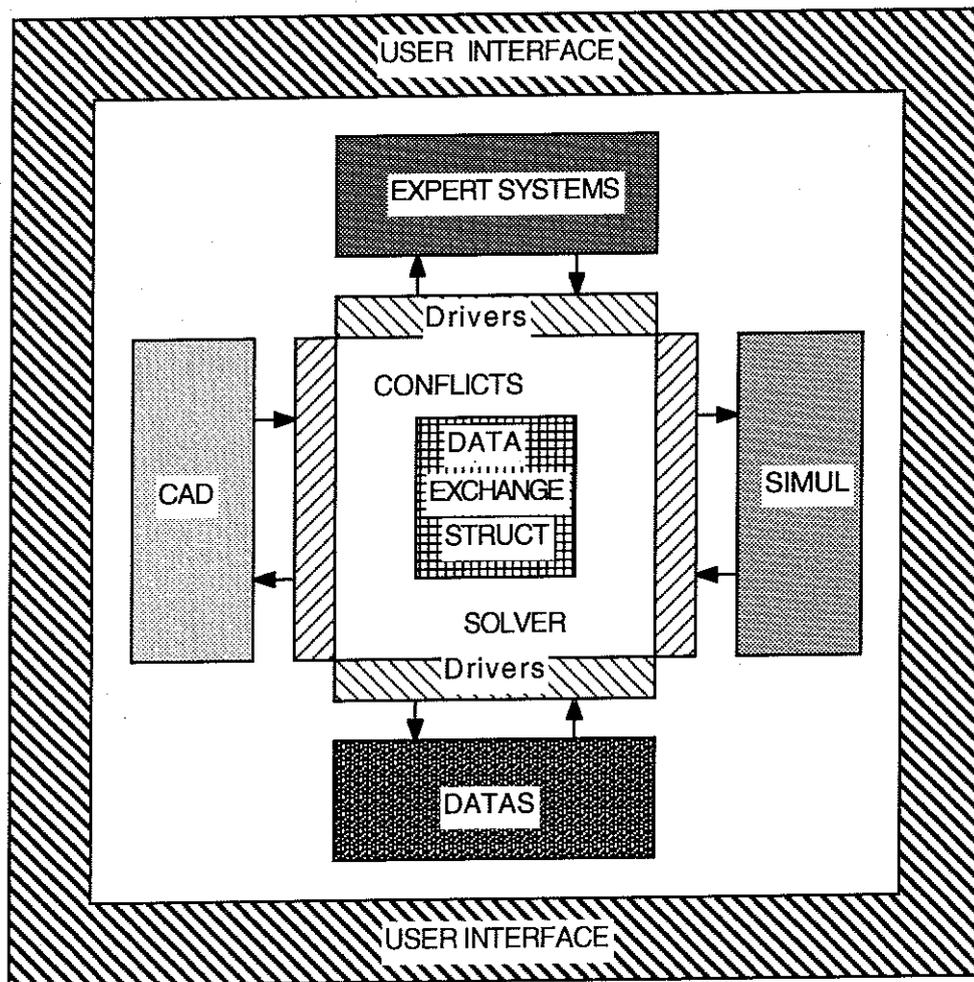


Fig. 9.19. Architecture du logiciel IDEFIX

Chacun des 4 premiers modules peut donner accès à un nombre non limité de logiciels appartenant à cette catégorie pour autant que le logiciel soit disponible et que le module d'interfaçage fasse partie du logiciel intégré. L'activation d'un de ces modules se déroule toujours selon une procédure à 4 temps.

1. Sélection du logiciel de CAO, ou du logiciel de simulation, ou de la base de données, ou de la base de connaissance requis.
2. Lecture de la structure centrale et préparation des fichiers de données pour le logiciel requis (suivant les méthodes décrites en 9.3.3).
3. Exécution du logiciel requis (en utilisant la procédure d'échange décrite en 9.3.6).
4. Ecriture des résultats des logiciels requis dans la structure centrale (suivant également les méthodes décrites en 9.3.3).

L'ensemble des fonctionnalités de IDEFIX est repris à la figure 9.20 et au tableau 9.3. Il est à noter que ces fonctionnalités apparaissent tout à fait générales et ne dépendent pas de l'application concernée. C'est la définition de la structure centrale et la définition des logiciels connectés au système qui confèrent au système sa spécificité. Par exemple, dans le cas de l'application à la conception d'un bâtiment, la structure centrale définit des classes d'objets appartenant au domaine du bâtiment (wall, room, window, ...) et les logiciels connectés émargent aux familles CAO, simulation thermique, bases de données "matériaux", bases des connaissances spécialisées dans le domaine du bâtiment. Pour aborder d'autres applications, il s'agit de redéfinir la structure centrale (quoique certaines classes d'objets peuvent apparaître réutilisables) et de sélectionner des logiciels appropriés au domaine concerné. En fonction de ces considérations, les spécifications données en 9.2.1 et 9.2.2 apparaissent donc bel et bien respectées : la solution proposée répond au cahier des charges établi au début de l'étude.

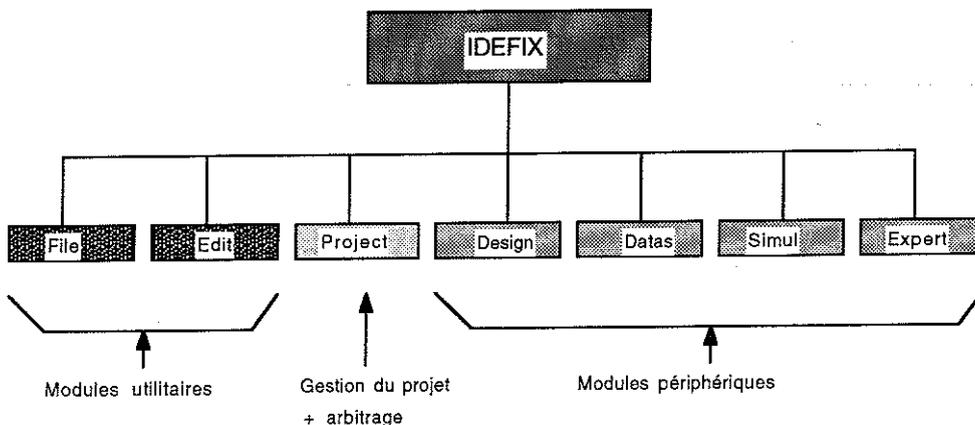


Fig. 9.20. Fonctions de IDEFIX

* File *	:	[	Project files manager]
[New ]	:	[	Creates a new application]
[Load ]	:	[	Loads an existing application]
[Save ]	:	[	Saves the current application]
[Config ]	:	[	Configures the system]
[Delete ]	:	[	Deletes a selected application]
[Dir ]	:	[	Lists the current directory content]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
[Exit ]	:	[	Exits to DOS]
* Edit *	:	[	Project file editor]
[Select ]	:	[	Selects the file to edit]
[Edit ]	:	[	Edits the selected file]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
* Project*	:	[	General management of the current project]
[Init ]	:	[	Initiates a new database]
[Clear ]	:	[	Clears the current database]
[Select ]	:	[	Selects a previous version of the project]
[Change ]	:	[	Adds a new version to the current project]
[View ]	:	[	Displays the current database content]
[Evaluate]	:	[	Evaluates the current project]
[Load ]	:	[	Retrieves the current database content]
[Save ]	:	[	Writes the current database on file]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
* Design *	:	[	Access to a CAD software]
[Select ]	:	[	Selects the CAD software]
[ReadDB ]	:	[	Reads the central database and inputs to CAD program]
[Execute ]	:	[	Executes CAD program]
[WriteDB ]	:	[	Writes CAD outputs to central database]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
* Datas *	:	[	Access to several building databases]
[Select ]	:	[	Selects the peripheral database to activate]
[ReadDB ]	:	[	Reads the central database and inputs to selected database]
[Execute ]	:	[	Consults selected database]
[WriteDB ]	:	[	Writes peripheral database outputs to central database]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
* Model *	:	[	Access to several building simulation programs]
[Select ]	:	[	Selects simulation program to use]
[ReadDB ]	:	[	Reads central database and prepares simulation files]
[Execute ]	:	[	Executes simulation programs]
[WriteDB ]	:	[	Writes simulation outputs to central database]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]
* Expert *	:	[	Access to an expert system software]
[Select ]	:	[	Selects knowledge base to activate]
[ReadDB ]	:	[	Reads central database and prepare expertise files]
[Execute ]	:	[	Executes expert system inference]
[WriteDB ]	:	[	Writes expertise outputs to central database]
[Menu ]	:	[	Returns to the main menu]

Tableau 9.3. Structure fonctionnelle de IDEFIX

D'un point de vue plus strictement technique, la version actuelle du logiciel IDEFIX apparait constituée de 11 000 lignes de programmation en Turbo-Pascal qui se répartissent de la façon suivante entre les différents modules:

Programme principal:	700	
Module "File":	225	
Module "Edit":	230	
Module "Project":	570	
Module "Design":	370	
Module "Datas":	230	
Module "Model":	1460	(MBDSA)
	760	(Suncode)
	1470	(TRNSYS)
Module "Expert":	370	
Structure centrale:	3000	
Modules utilitaires:	1400	
Module "Swap":	225	

Le code exécutable occupe 225K octets de mémoire RAM et tourne sur tout PC compatible avec 640K de RAM et un disque dur. Il donne par ailleurs accès aux logiciels commerciaux suivants: AutoCAD, MBDSA, Suncode, TRNSYS, Edit2.

9.4. UTILISATION DE IDEFIX POUR UN PROBLÈME DE CONCEPTION DE BÂTIMENTS

9.4.1. Préambule

L'objet de ce paragraphe est d'illustrer l'application de IDEFIX pour un problème de conception de bâtiments. Pour ce faire, le texte simule une session de travail et sera illustré de photographies d'écran destinées à placer le lecteur dans les conditions d'une utilisation réelle du logiciel.

9.4.2. Accès au système

A l'entrée de IDEFIX, l'utilisateur reçoit le "logo" de logiciel et se trouve d'emblée confronté à l'interface (fig. 9.21 et 9.22).

9.4.3. Configuration du logiciel

A ce stade, l'utilisateur a le loisir de configurer son système en sélectionnant :

- les logiciels connectés
- les systèmes experts à utiliser "en assistance"
- les critères d'évaluation du projet

Cette opération est activée à partir du menu "Config" du module "File" (fig. 9.23). Dans notre cas, nous choisissons d'utiliser les logiciels "AutoCAD", MBDSA, Suncode, TRNSYS et d'être assistés des systèmes experts "Ene", "Noi", "Lig", "Law" et "Mgr". Par ailleurs, le projet sera évalué par rapport à deux critères: un critère énergétique défini par la consommation d'énergie du bâtiment entre le 1/04 et le 10/04, un critère de confort défini par le nombre d'heures de surchauffe (>22°C) pendant la même période. Chacun de ces critères est nanti d'une fonction de valeur.

9.4.4. Définition du projet

A partir du module "Project", l'utilisateur peut initialiser un nouveau projet ("Init"), créer une nouvelle version d'un projet en cours ("Clear"), réutiliser une version antérieure du projet en cours ("Change"). A ce moment-là, il est prêt à travailler (fig. 9.24). dans notre cas, nous définissons un projet "FUL" situé à Arlon, et dont la première version s'appelle "Base".

9.4.5. Session de conception (CAO)

Le point d'entrée usuel est constitué par le module CAO. L'utilisateur pénètre alors dans AutoCAD et y exécute son travail de conception (fig. 9.25) en suivant les principes énoncés en 9.3.3.2. La figure 9.25 représente un bâtiment très simple composé d'une dalle, de six parois verticales extérieures et d'une toiture horizontale. Le bâtiment comprend trois fenêtres d'orientation sud, est et ouest et une porte en façade sud. La constitution des parois extérieures est classique (blocs de béton, isolant, briques). Pour aboutir à un dessin extrêmement rapide, une bibliothèque des parois de construction les plus courantes (à la dimension 1m x 1m) a été constituée. L'introduction d'une paroi quelconque revient à sélectionner le module désiré dans un menu iconique, à le dilater aux dimensions voulues et à lui donner l'orientation souhaitée. Si la définition de la paroi le prévoit, certains paramètres (par l'exemple l'épaisseur d'isolant) peuvent être modifiés au moment de l'introduction dans le dessin.

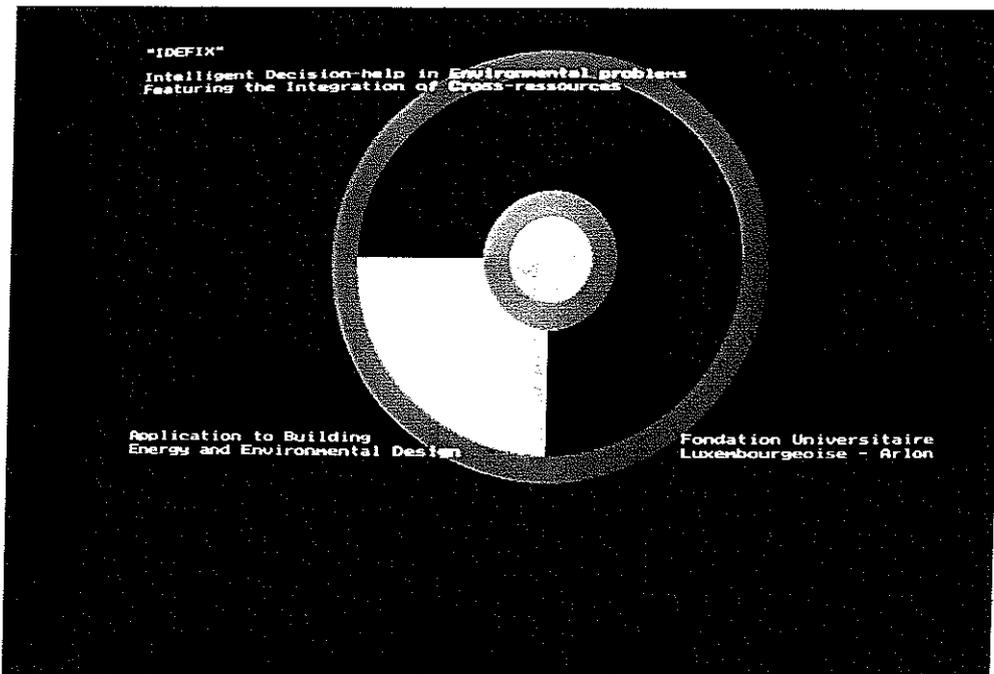


Fig. 9.21. "Logo" de IDEFIX

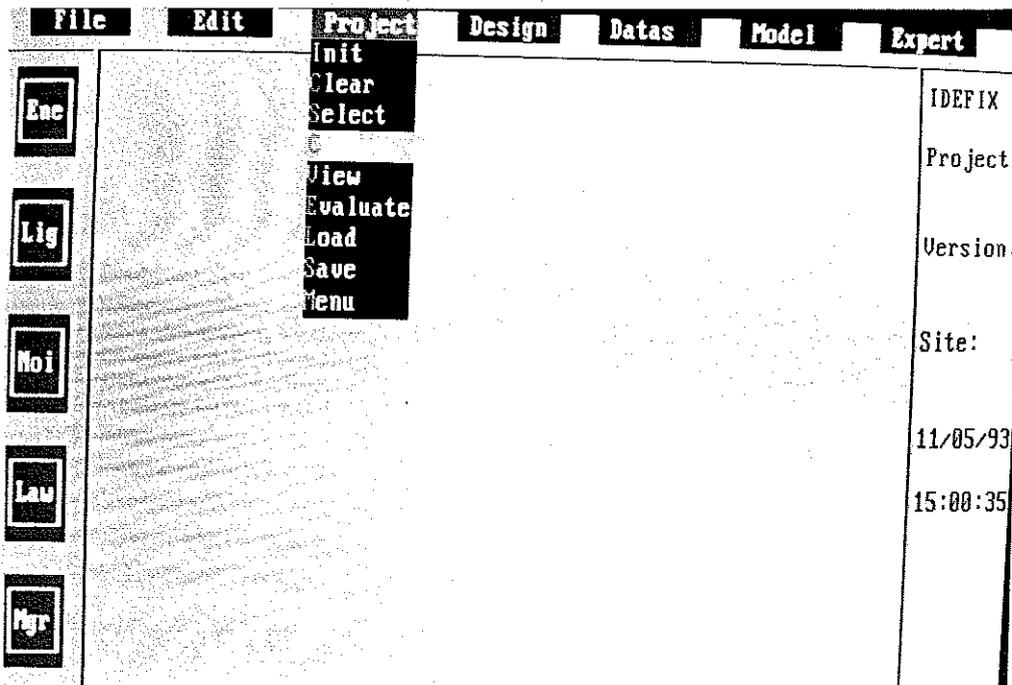


Fig. 9.22. Interface-utilisateur de IDEFIX

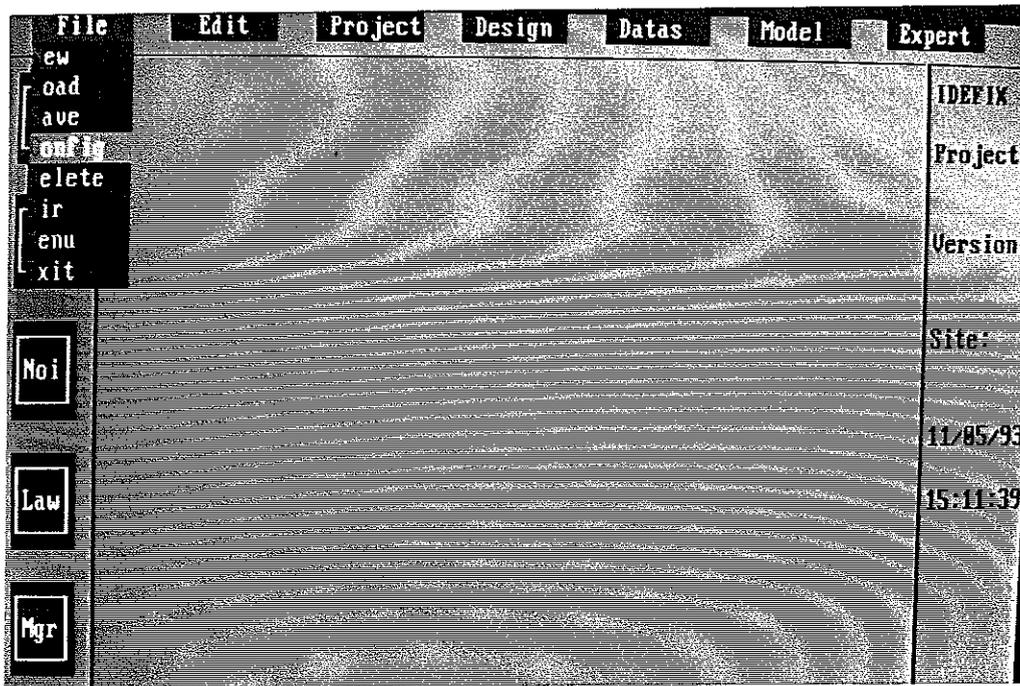


Fig. 9.23. Configuration de IDEFIX

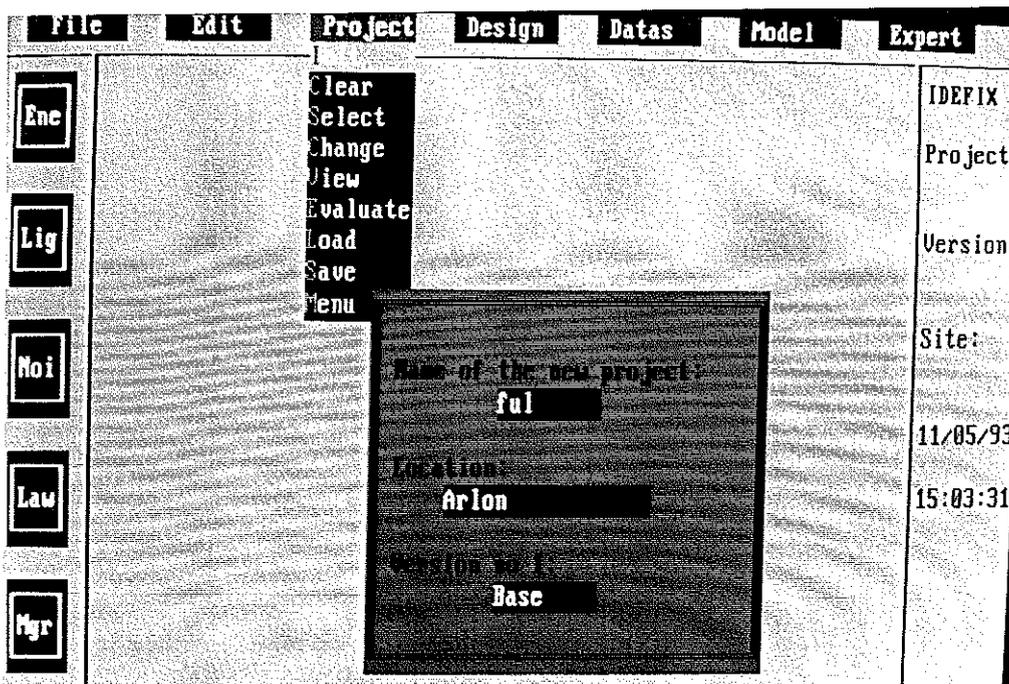


Fig. 9.24. Initialisation d'un nouveau projet dans IDEFIX

Dès que le projet a atteint un niveau de détail suffisant, l'utilisateur peut sauver son dessin (y compris réaliser l'extraction des attributs) et sortir de AutoCAD. La procédure d'échange le ramène alors automatiquement dans IDEFIX d'où il peut activer le transfert des informations dans la structure centrale, par le menu "writeDB" du module "Design" (fig. 9.26). Les objets issus de la session sont alors créés et instanciés suivant la méthode décrite en 9.3.3.2. Les systèmes experts implémentés en tant qu'assistants sont alors activés (comme ils le seront à chaque modification de la structure centrale) et délivrent les conclusions compatibles avec l'information dont ils disposent. Le cas échéant, il déclenchent une procédure de recherche dans certaines bases de données.

9.4.6. Session "bases de données"

L'utilisateur peut lui-même déclencher une procédure de recherche dans l'une des bases de données implémentées. Pour ce faire, il y a lieu de sélectionner la base de données parmi celles disponibles (fig. 9.27), lire le contenu de la structure centrale ("select") afin de déterminer l'information manquante ("readDB"), activer le gestionnaire de base de données ("execute") avec de nouveau, réalisation du processus d'échange (fig. 9.28) et, ensuite, mettre à jour la structure centrale ("writeDB") avec l'information recueillie après réalisation du processus d'échange inverse. Au terme de la mise à jour, les systèmes experts "assistants" sont de nouveau activés. Dans notre cas, la base de données "material" est sélectionnée. Pour tous les matériaux identifiés dans la structure d'échange de données, les propriétés "conductivité thermique", "densité" et "capacité thermique" sont recherchés. La valeur des champs requis est alors communiquée à la structure centrale.

9.4.7. Session "Simulation"

Si le projet en cours est considéré comme évaluable, il est maintenant possible de réaliser une simulation numérique du bâtiment. A cette fin, l'utilisateur sélectionne ("select") le logiciel voulu parmi ceux disponibles (fig. 9.29), actionne la lecture de la structure centrale ("read DB") afin de constituer les fichiers d'entrée nécessaires à la simulation, demande l'exécution de la simulation ("execute"), ce qui a pour conséquence de charger le logiciel requis (par exemple MBDSA) en mémoire après transfert de IDEFIX en mémoire auxiliaire (fig. 9.30). Après la fin de la simulation, IDEFIX est rechargé à sa place et l'utilisateur peut transférer les résultats de la simulation dans la structure centrale ("write DB"). Les systèmes experts assistants sont de nouveau activés. Dans notre exemple, la procédure de simulation utilise le logiciel "MBDSA". L'opération "readDB" réalise dès lors instantanément la création et la constitution complète des fichiers ".BLG", ".PRT", ".DAT" et ".SIM" (voir 9.3.3.3), opération qui pouvait réclamer plusieurs jours de travail si elle était effectuée "manuellement". L'opération "execute" déclenche automatiquement et séquentiellement les modules PREPA, PRETA et MBDSA (voir figure 9.13).

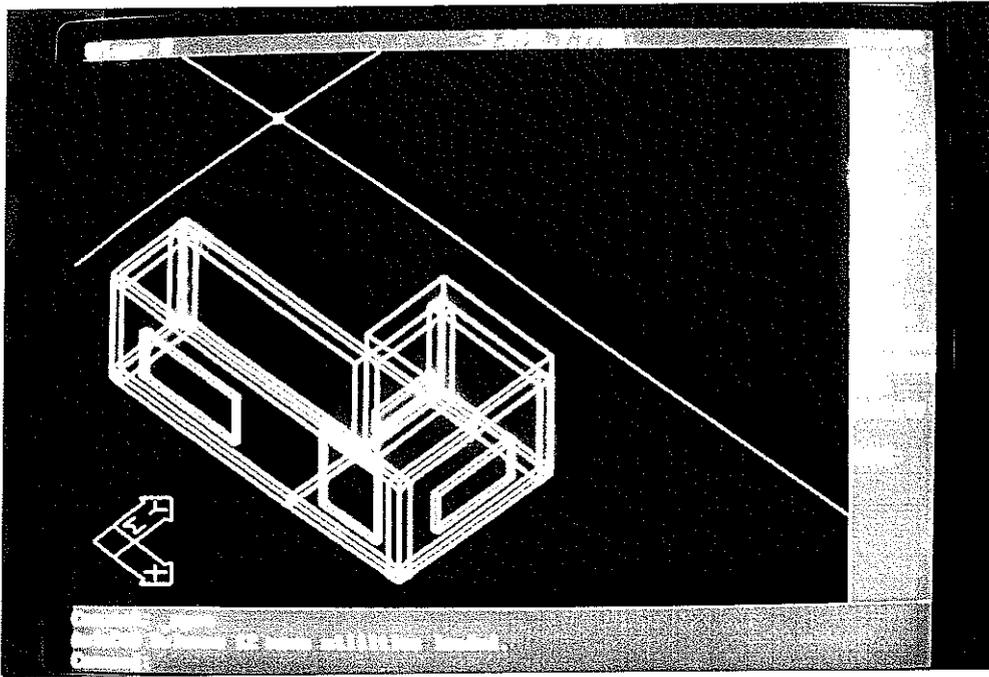


Fig. 9.25. Session CAO dans IDEFIX

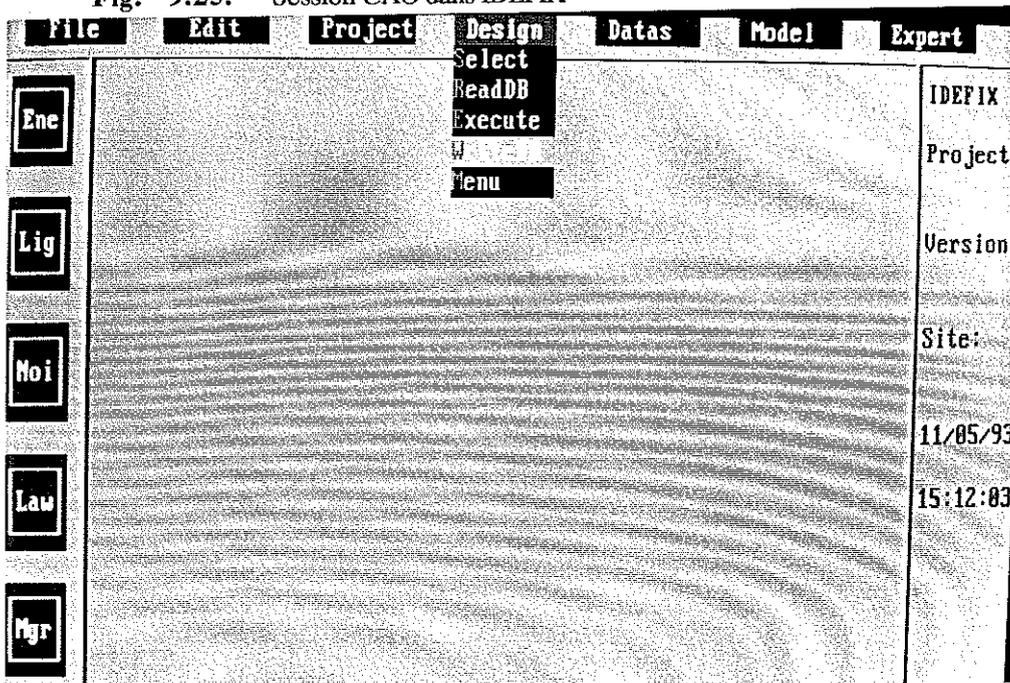


Fig. 9.26. Transfert d'informations du module CAO vers la structure centrale

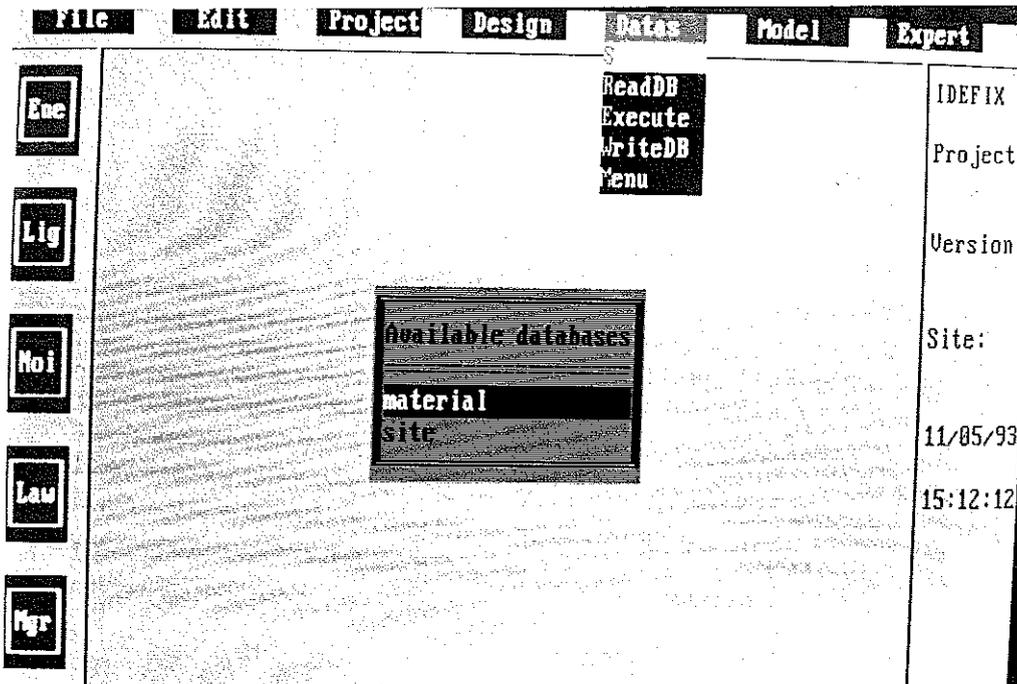


Fig. 9.27. Sélection d'une base de données dans IDEFIX

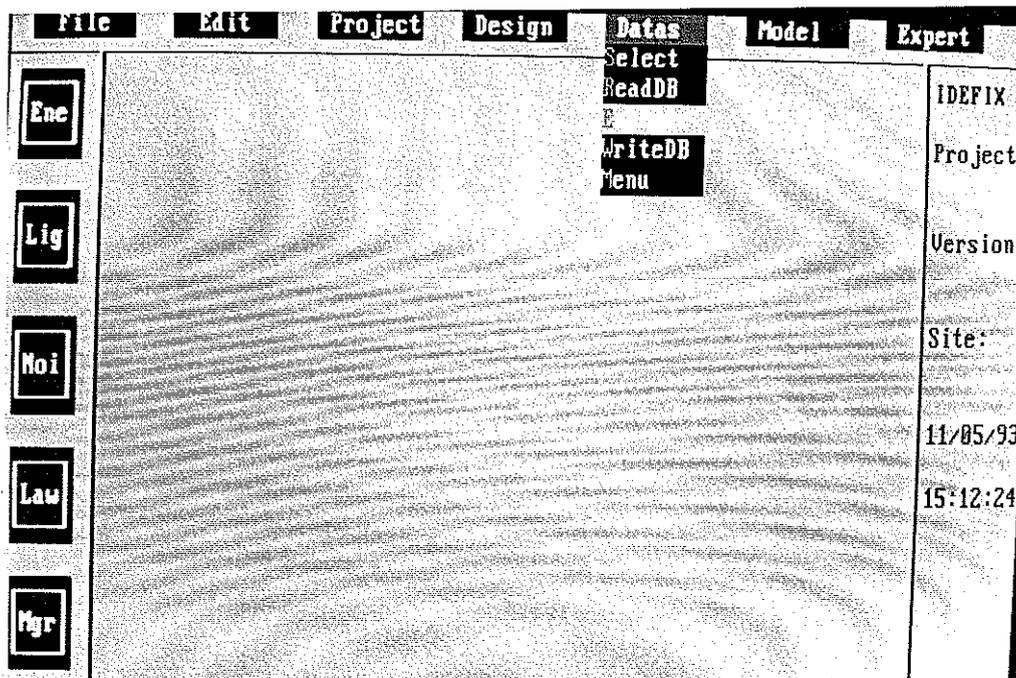


Fig. 9.28. Exécution d'une requête dans la base de données sélectionnée

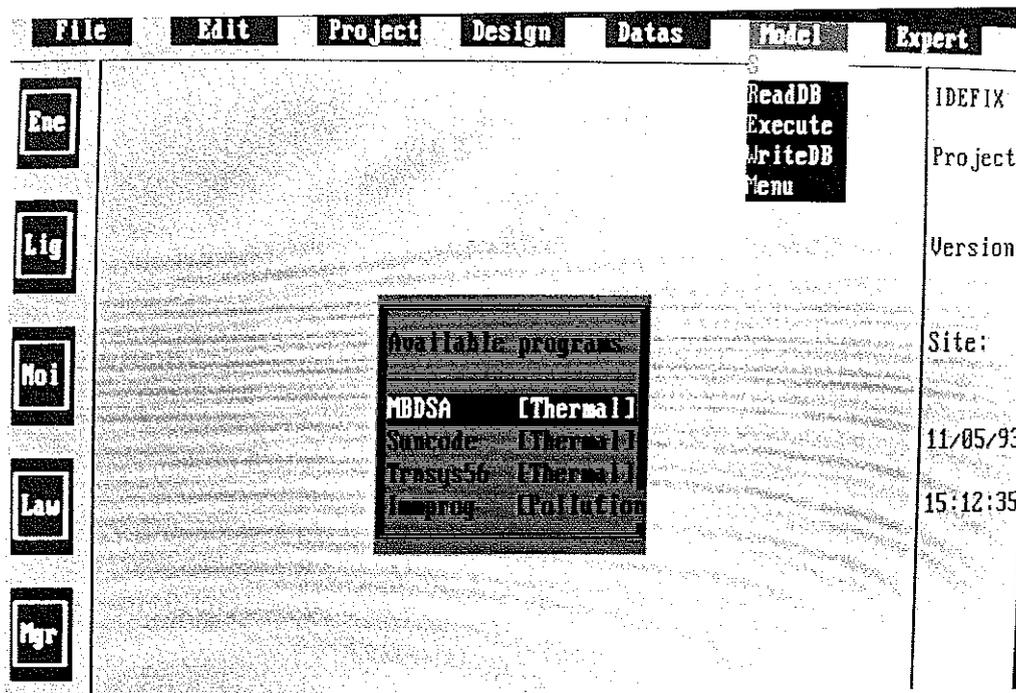


Fig. 9.29. Sélection d'un logiciel de simulation dans IDEFIX



Fig. 9.30. Exécution d'une simulation numérique dans IDEFIX

En l'occurrence, la période du 1er au 10 avril est simulée en utilisant les données climatiques de la station la plus proche, à savoir Saint-Hubert. La simulation fournit en sortie les grandeurs suivantes: température intérieure du bâtiment (considéré comme une seule zone, ce qui constitue une limitation actuelle importante du système), charge en chauffage, charge en ventilation, gains solaires dans le bâtiment. Ces valeurs sont communiquées aux objets "output" de la structure centrale. Ils peuvent dès-à-présent être visualisés sous forme de courbe selon une procédure décrite au paragraphe suivant.

9.4.8. Session "Gestion du projet"

A tout moment du déroulement du projet, il est en effet possible de visualiser le contenu de la structure centrale par l'intermédiaire de l'option "view" du menu "Project". Cette dernière donne accès à un menu reprenant les différentes classes disponibles (fig. 9.31). Après sélection d'une classe, l'utilisateur choisit une instance (un objet) parmi celles créées et peut alors visualiser le contenu de l'objet en question. La figure 9.32 montre la visualisation d'un objet de la classe "wall" (le mur ouest du bâtiment représenté à la figure 9.25) tandis que la figure 9.33 représente la visualisation d'un objet de la classe "output", à savoir un des résultats de la procédure de simulation 9.4.7 (la température de l'air dans le bâtiment). Parmi les méthodes attachées à cette classe figure une procédure de représentation graphique des résultats. En outre, l'objet est muni de quelques indices statistiques élémentaires.

9.4.9. Session "Expertise"

De la même façon que pour la simulation, il est possible de réaliser une expertise du projet en cours à l'aide d'une des bases de connaissances implémentées. Celles-ci peuvent d'ailleurs différer de celles installées en tant qu'assistants à l'utilisateur. Pour ce faire, l'utilisateur sélectionne la base de connaissances voulue ("select") (fig. 9.34). Ensuite, il active le menu "read DB" afin de traduire le contenu de la structure centrale dans un contexte manipulable par le système expert. L'inférence peut alors être déclenchée ("execute") par un moteur connecté au système. Au terme de l'inférence, l'utilisateur renvoie les résultats de l'expertise sous forme de "messages" dans la structure centrale ("write DB"). Ces messages seront également accessibles par l'option "view" du module "project" après sélection de la classe "expertise" (fig. 9.35). L'exemple montre une expertise réalisée en utilisant la base de connaissances "Thermal" qui fournit la conclusion: "Optimal south glazed ratio is 0.22".

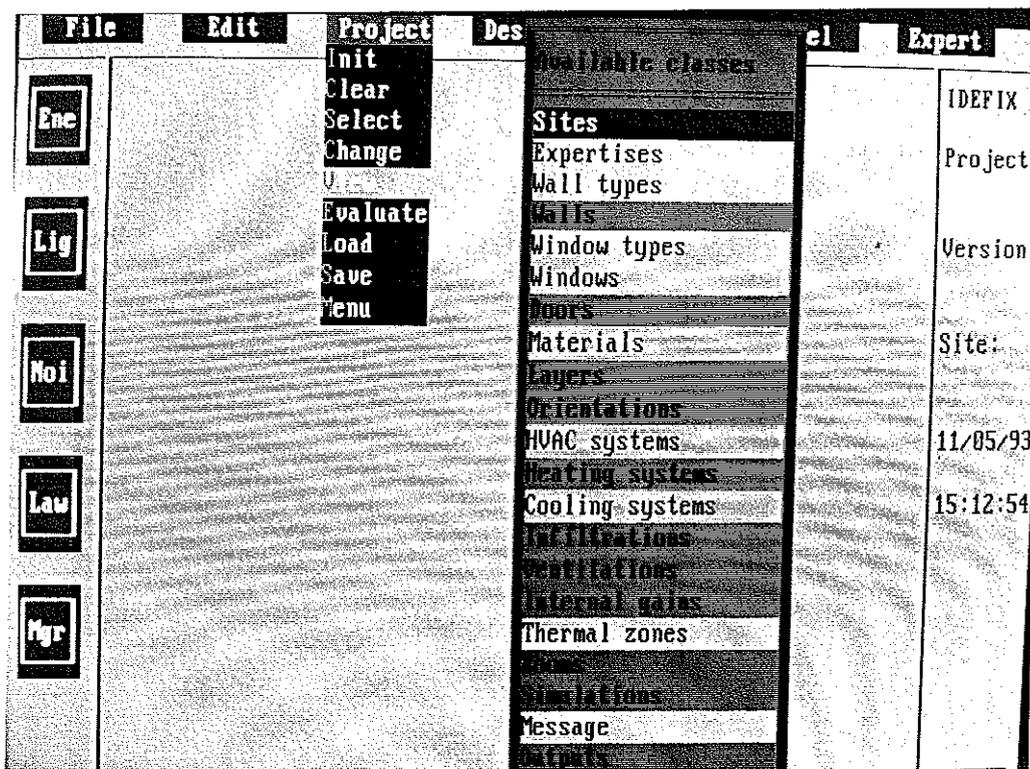


Fig. 9.31. Menu de visualisation des classes dans IDEFIX

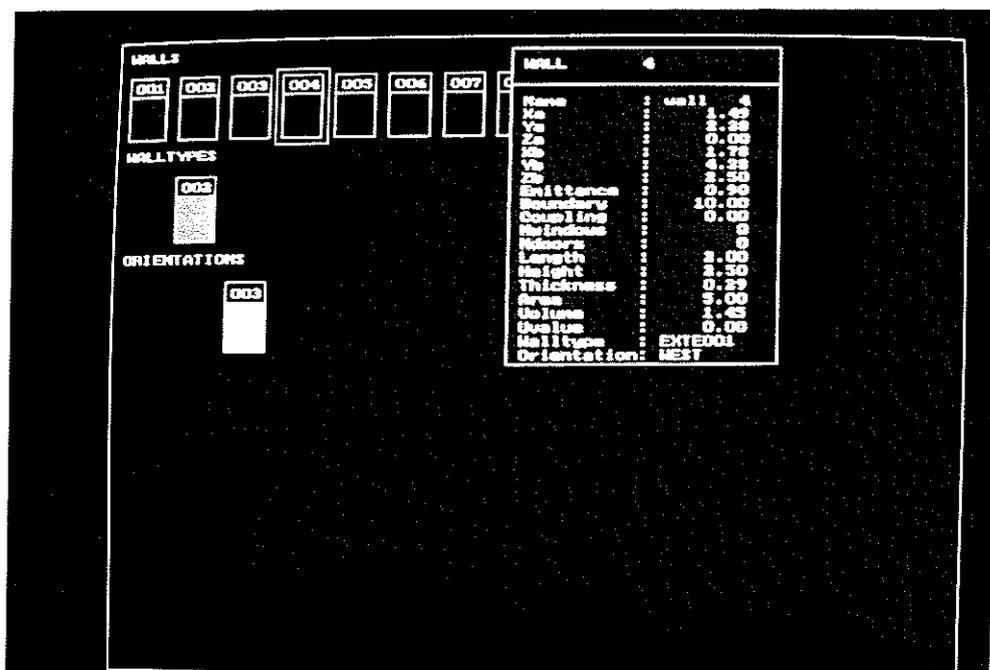


Fig. 9.32. Visualisation d'un objet de la classe "wall"

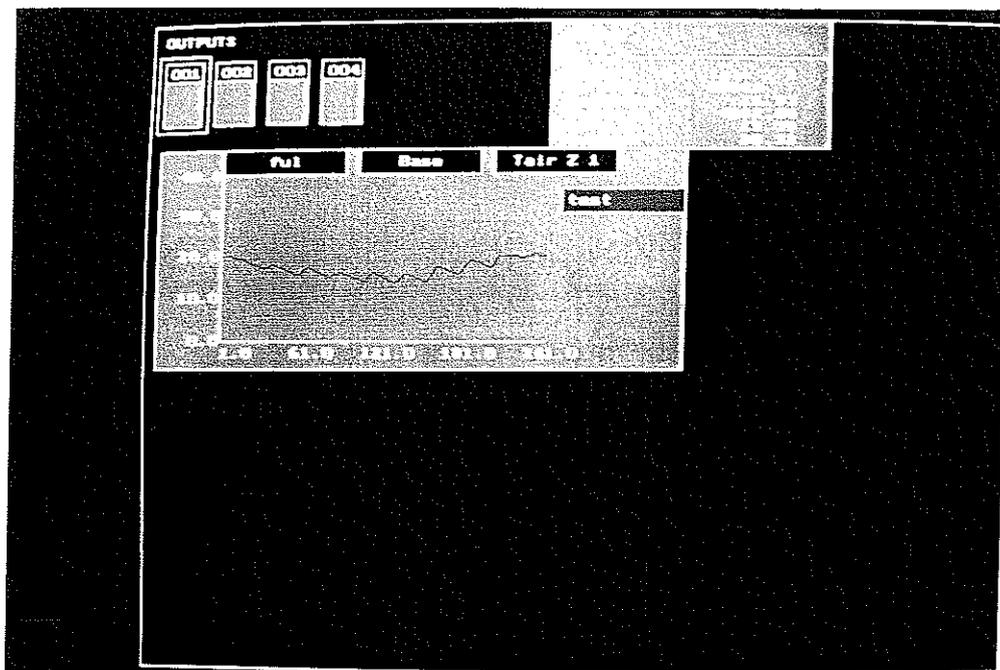


Fig. 9.33. Visualisation d'un objet de la classe "output"

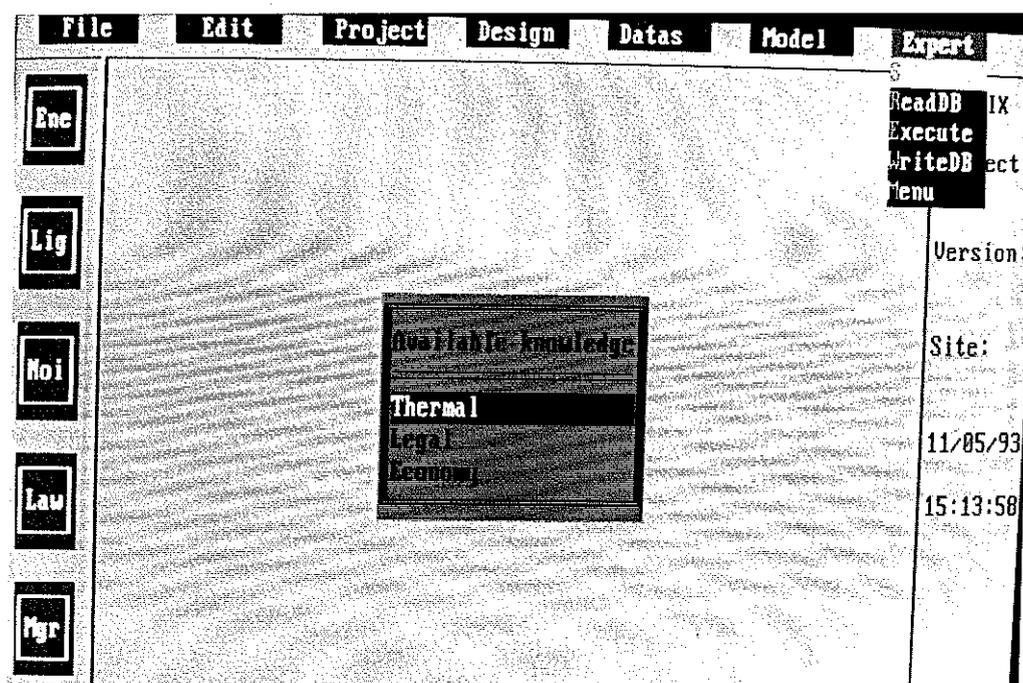


Fig. 9.34. Sélection d'une base de connaissances dans IDEFIX

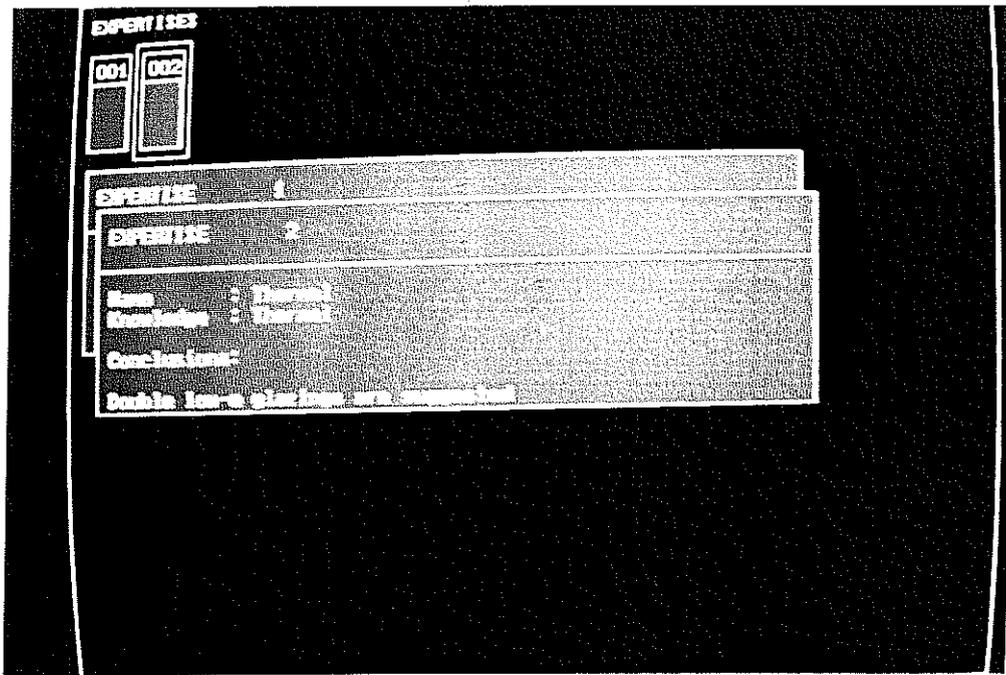


Fig. 9.35. Visualisation d'un objet de la classe "expertise"

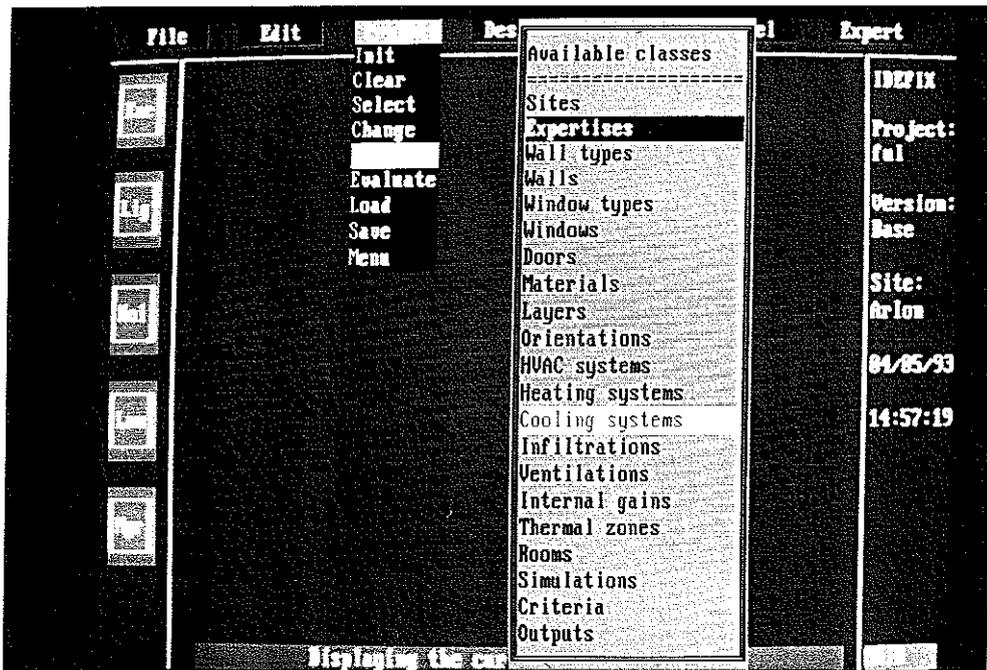


Fig. 9.36. Evaluation multicritère d'un projet

9.4.10. Session d'évaluation

Lorsque l'utilisateur en ressent la nécessité, il peut réaliser une évaluation globale de son projet par l'intermédiaire de l'option "Evaluate" du module "Project" (fig. 9.36). Celui-ci active le processus d'analyse multicritère qui réalise, grâce aux méthodes décrites en 9.3.4.2, une évaluation des différents critères et de l'indice multicritère et ce, pour toutes les versions disponibles du projet. Au terme du processus, l'utilisateur a sous les yeux, une synthèse comparative des différentes versions du projet et de leurs performances (fig. 9.37), relativement aux critères définis en 9.4.3. La figure montre les performances de deux versions celle représentée par la figure 9.25 et une alternative ("modified") dépourvue de vitrages (dans le but de tester deux configurations extrêmes). Ces deux versions sont évaluées par une analyse multicritère basée sur l'algorithme "Compromized programming" décrit en 9.3.4.2.

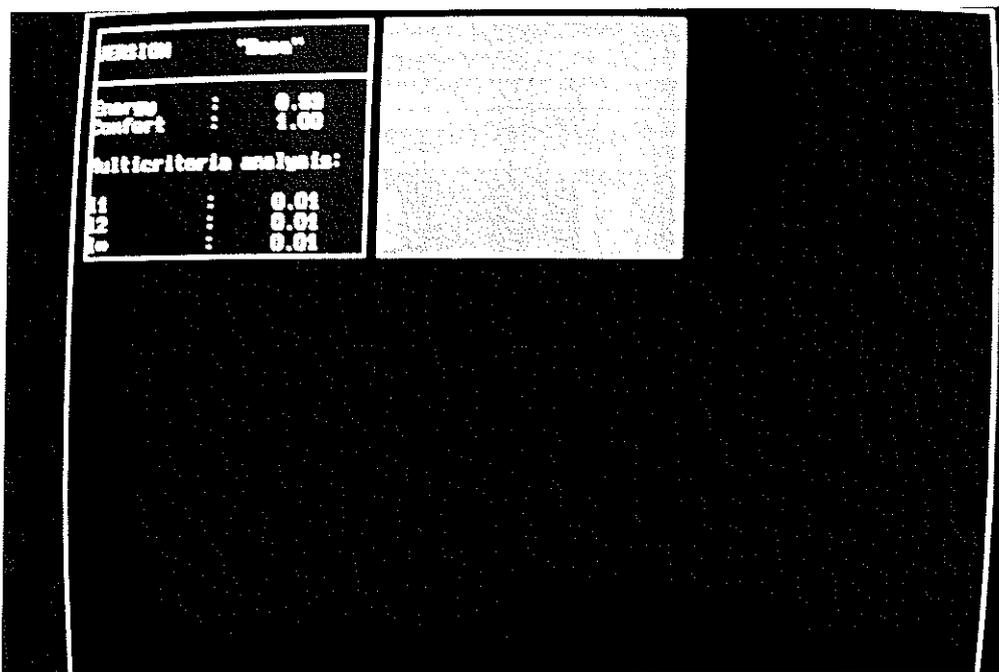


Fig. 9.37. Comparaison des performances de différentes versions d'un projet

Celui-ci utilise les fonctions de valeur attachées à chacun des critères. Pour le critère "énergie", le fonction de valeur se présente sous la forme d'une courbe monotone décroissante (fig 9.38a); pour le critère "confort", elle prend la forme indiquée par la figure 9.38b. Il est important de noter que ces fonctions de valeur peuvent se voir modifiées par l'utilisateur en cours de session de travail, par exemple pour affiner la comparaison dans une gamme plus étroite de performances. Dans ce cas, l'entièreté des variantes du projet se voient réévaluées par rapport à ces nouveaux critères.

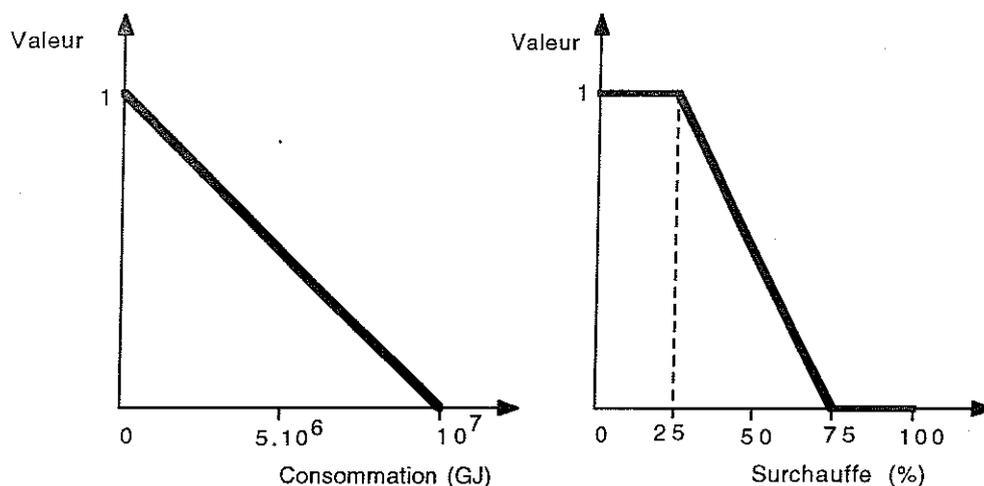


Fig. 9.38. Fonctions de valeur des critères "énergie" et "confort"

Au terme de ce processus d'évaluation, l'utilisateur peut soit poursuivre le travail sur la version en cours, soit revenir à une version antérieure ("change"), soit initier une nouvelle version ("clear"), soit initier un nouveau projet ("init"). Dans tous les cas, il se trouve ramené au point 9.4.5. Il peut également clôturer son travail et sauver le projet en cours ("Save").

9.4.11. Synthèse et perspectives de développement

L'ensemble des opérations décrites ci-dessus se déroule de manière conviviale en réclamant une intervention réellement minimale de la part de l'utilisateur qui peut ainsi se consacrer pleinement à son travail créatif de conception. Si le prototype actuel offre déjà toutes les possibilités de travail évoquées ci-dessus, il souffre néanmoins de certaines limitations qui devraient être comblées par des développements futurs :

- le prototype ne peut traiter que des bâtiments "simples" (constitués d'une seule zone thermique),
- les bases de connaissances attachées au système apparaissent encore embryonnaires,
- la connexion de la structure centrale avec une "base de données orientées objet" (OODB) n'a pas encore été implémentée.

Il faut cependant observer que ces limites ne remettent d'aucune façon la méthode en cause. Le travail effectué confirme et démontre la faisabilité de l'approche dans ses moindres détails, ce qui constituait son but affirmé. Le développement d'une version complète du système relève d'autres objectifs qui dépassent ceux assignés à ce travail, lequel poursuivait avant tout une démarche de recherche méthodologique susceptible d'être appliquée dans un grand nombre de situations. Dans cette optique, d'autres ressources informatiques que celles utilisées dans les pages qui précèdent peuvent se voir connectées au système. Par exemple, il apparaît évident que le module d'analyse multicritère semble "léger" aux yeux des spécialistes en ce domaine. La méthodologie proposée n'exclut nullement le recours à des outils plus performants, voire à des logiciels commerciaux dédiés à cette tâche comme Electre ou Prométhée (Bana e Costa et Vincke, 1990).

9.5. GÉNÉRALISATION À D'AUTRES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

9.5.1. Définition et position de IDEFIX

Un des objectifs à la base de ce travail consistait à développer une méthodologie d'intégration suffisamment générale que pour être applicable à d'autres problèmes d'environnement posés sous la forme de problèmes de décision.

Le chapitre 8 a déjà montré combien l'évolution des systèmes de Conception Assistée par Ordinateur tendait à les rapprocher, du point de vue de l'architecture, des Systèmes d'Information Géographique (GIS). Ces macro-logiciels ont même tendance à devenir des véritables logiciels intégrés dans la mesure où ils encapsulent des connaissances d'ordres divers : systèmes experts, bases de données, modèles de calcul et, bien entendu, modules graphiques.

Dans le domaine de la construction, les logiciels intégrés d'aide à la conception sont désignés sous le vocable de "Design Support Environments" (DSE). Par ailleurs, dans le domaine environnemental, ces dernières années ont vu l'émergence des différents projets de "Systèmes d'Aide à la Décision" ("Decision Support Systems", DSS) (Paruccini, 1992). L'analogie entre les deux familles de systèmes va beaucoup plus loin que la simple similitude d'initiales. En effet, la figure 9.39 montre l'architecture d'un Système de Support à la Décision et peut être légitimement rapprochée de la figure 9.4 ou 9.5 qui schématisent l'approche suivie dans ce travail.

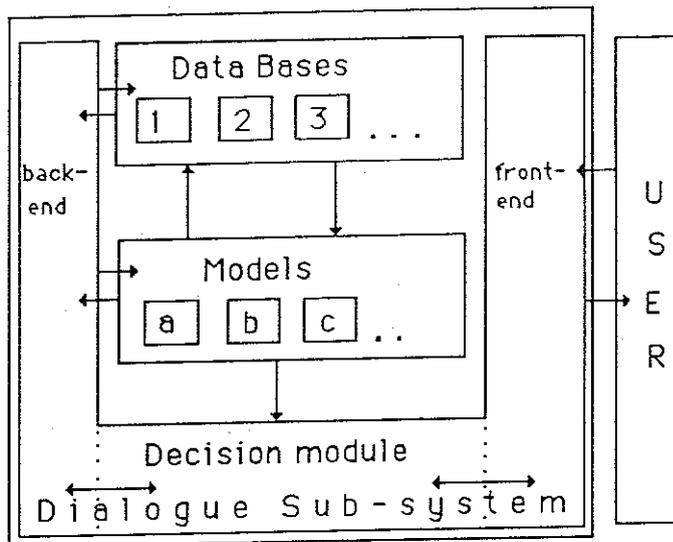


Fig. 9.39. Architecture d'un Système d'Aide à la Décision

D'une manière générale, "un DSS est un système interactif, flexible et adaptable, qui utilise des règles de décision, des modèles, des bases de données et des représentations formelles convenables des requêtes des décideurs pour suggérer des actions spécifiques et applicables afin de résoudre des problèmes qui ne peuvent être résolus par les techniques d'optimisation de la Recherche Opérationnelle. Par conséquent, un tel système assiste les processus de décision complexe et en augmente l'efficacité" (Turban, 1990).

Cette définition ne fait que conforter le point de vue de similitude entre les deux approches. Telle quelle, elle peut en effet qualifier le système développé dans les pages qui précèdent. Pour s'en convaincre, un examen plus détaillé de la structure d'un DSS révèle qu'un tel système inclut généralement trois sous-systèmes en interaction: un sous-système de dialogue, un sous-système de données, un sous-systèmes de modèles. Ces sous-systèmes schématisent les trois éléments fondamentaux d'un DSS : les bases de données, les modèles et l'interface-utilisateur qui permet à celui-ci d'interagir avec les bases de données et les modèles. Plus précisément, le sous-système de dialogue consiste en un "back-end" comprenant le logiciel de contrôle, l'intégration des bases de données et des modèles (analogues aux "modules d'interfaçage" décrits en 9.3.3) et en un "front-end" contenant le logiciel assurant l'interface entre l'utilisateur et le système (analogue à l'interface-utilisateur décrite en 9.3.5). La figure 9.38 précise ces composantes. Ces systèmes utilisent généralement des techniques d'analyse multicritère (voir 9.3.4) et, de ce fait, doivent satisfaire les contraintes suivantes :

1. Possibilité de modéliser les préférences du décideur, même si elles évoluent au cours du processus d'utilisation du système.
2. Aptitude à rechercher les solutions satisfaisantes, en établissant les objectifs, en élaborant des alternatives acceptables et en les évaluant.
3. Facilité d'interaction fréquente entre le système et l'utilisateur pour vérifier la consistance entre le processus de décision et les préférences, montrer les performances de la solution retenue de façon efficace et estimer les solutions proposées. Enfin, les systèmes d'aide à la décision développés dans le cadre de l'analyse multicritère doivent offrir un système ouvert et modulaire qui permette une intégration aisée de nouveaux modèles et de nouvelles bases de données.

Ces spécifications apparaissent vérifiées par le prototype IDEFIX et permettent d'affirmer, sans grand risque de se tromper, que la méthodologie d'intégration proposée dans ce travail débouche sur un système qui peut être considéré comme un Système d'Aide à la Décision, appliqué à un problème environnemental particulier, celui de la conception intégrée d'un bâtiment. Et cela même si cette conclusion surgit au terme d'un processus relativement intuitif, assez différent de celui suivi par les professionnels de l'informatique.

9.5.2. Le rôle des DSS dans la gestion de l'environnement (Paruccini, 1992)

La complexité inhérente aux processus de gestion de l'environnement engendre des difficultés de choix pour les décideurs qui, de plus, ont à faire face à une opinion publique de plus en plus avide d'information et de justification. Cette même complexité requiert une approche scientifique pour la formulation des objectifs, le développement d'alternatives et le choix de critères permettant de les évaluer. C'est en réponse à ces exigences que sont apparus les DSS afin d'apporter une contribution basée sur une étude analytique et les outils scientifiques disponibles.

Les caractéristiques des problèmes environnementaux justifiant l'utilisation d'un DSS peuvent être résumées de la façon suivante :

- Importance des enjeux impliqués. A l'échelle mondiale, l'enjeu concerne même la survie de la planète.
- Structure complexe. Un problème environnemental met en évidence un tissu de sous-problèmes en interaction mutuelle. De cette complexité résulte une grande difficulté à évaluer informellement les avantages et désavantages des différentes alternatives.

- Absence d'un "expert global". L'étendue des problèmes constitutifs d'une situation environnementale rend impossible la prise en charge, par une seule personne, de toutes les disciplines. Cette carence justifie le fait de confier à un système informatique le rôle du mécanisme intégrateur nécessaire. A ce titre, l'ordinateur n'apparaît pas comme un substitut aux activités humaines mais bien comme un instrument permettant à l'homme de décupler ses possibilités d'analyse et de réflexion. Il s'agit d'une constatation très importante dans la mesure où l'informatique a été, au cours de ces vingt dernières années, trop considérée comme une "boîte magique" résolvant tous les problèmes et supprimant la nécessité de réfléchir au problème lui-même.
- Besoin de justification des mesures prises. L'impact sur le public des décisions prises devient de plus en plus important. A cela s'ajoute une pression exercée par les mouvements de défense de l'environnement sur les décideurs. Pour faire face de façon objective à cette pression, les décideurs nécessitent des moyens de justification de leur décision. Les moyens doivent mettre en oeuvre une solution intégrée, c'est-à-dire prenant en compte toutes les caractéristiques du problème, et pas seulement la composante écologique, dans une synthèse réellement environnementaliste.

De ces constats émergent finalement les deux aspirations profondes du développement d'un Système d'Aide à la Décision en gestion de l'environnement.

1. L'amélioration de la qualité des décisions prises. La structuration des problèmes permet de comparer les alternatives sur une base objective et également de mieux comprendre le fonctionnement du système. L'intégration permet au DSS de jouer le rôle de l'expert global absent évoqué ci-dessus.
2. La production d'une documentation technique pour justifier les décisions prises vis-à-vis des instances concernées et également de l'opinion publique. Un DSS permet de justifier, noir sur blanc, pourquoi une alternative a été retenue par rapport à une autre.

9.5.3. Quelques exemples de D.S.S.

Le développement de tels systèmes, utilisant les ressources de l'analyse multicritère, devient de plus en plus courant dans le domaine de la gestion de l'environnement. Quelques exemples suffiront à montrer l'étendue des applications possibles.

- IRIMS : ("Isp^ra RIsk Management Support"). Le système intègre différentes bases de données et des modèles de simulation dans le domaine de la production de substances chimiques dangereuses. Le système peut être utilisé pour l'aide à la gestion d'activités industrielles avec analyse du risque, l'évaluation de l'impact sur l'environnement et le choix entre scénarios alternatifs.
Une application importante de IRIMS a concerné la production de chlore aux Pays-Bas.
- HELP. Ce système travaille dans le domaine du transport des substances dangereuses. Pour une région donnée comprenant un réseau de routes entre différents points, pour une substance donnée et à une époque donnée, le système indique le moyen de transport le plus adéquat et le meilleur chemin, c'est-à-dire celui qui réduit simultanément le coût et les risques du transport. Le système prend en compte des éléments tels que la densité de population, l'utilisation du territoire, la densité du trafic, le type de voirie, les caractéristiques et les risques associés à la substance transportée.
- PURPLE. Ce système aide le décideur dans le domaine de la gestion des déchets urbains à une échelle régionale. Il propose différents scénarios de gestion et les évalue à partir de critères de coût, d'impact sur l'environnement, de niveau de recyclage des matières premières. Ce système a été appliqué à la Lombardie.
- RITO. Ce système concerne la gestion des déchets industriels toxiques et dangereux à l'échelle régionale et tente de réaliser le traitement de ces déchets dans la région elle-même. Le système est associé à un Système d'Information Géographique (GIS) et propose différents scénarios qui sont évalués par des techniques d'analyse multicritère.
- MAPO. Ce système travaille dans le domaine de la gestion et la planification de l'entretien d'un grand bassin de rivière, le Po en l'occurrence. Ce système propose différents scénarios alternatifs et les évalue sur base de critères économique, environnemental et "social". Le système adopte une approche continue : le nombre d'alternatives est infini et elles diffèrent par la valeur de leurs paramètres dans un espace mathématique de grandes dimensions.
- CADET. Ce système élabore des scénarios de collecte et de traitement des résidus urbains. Il intègre une approche globale et permet de simuler la mise en place d'une collecte sélective sur un habitat donné en tenant compte des gisements et des unités de traitement. Le résultat des simulations, qui permet de décrire de façon précise l'évolution du système sur une période allant de 1995 à 2015, se présente de façon synthétique sous la forme d'un bilan de matière, d'un bilan d'énergie et d'indicateurs écologiques (Cadet International SA, 1993).
- SEVEX SOURCE. Ce logiciel étudie la problématique de l'établissement des plans d'urgence en cas de risque majeur (dispersion des substances nocives par exemple). Eventuellement couplé à des modèles sophistiqués de dispersion de polluants, il permet de définir les éléments principaux des zones de planification d'urgence (Levert et al, 1993).

9.5.4. IDEFIX comme générateur de DSS

Parmi les objectifs affirmés de cette thèse figurait la possibilité de réutiliser la méthodologie choisie pour le développement du logiciel intégré afin d'aborder une gamme de problèmes environnementaux. Les paragraphes précédents ont montré que le concept IDEFIX répondait bien aux spécifications usuelles d'un Système d'Aide à la Décision tel que ceux développés pour la gestion de l'environnement. Par conséquent, il apparaît réaliste d'envisager la génération d'autres systèmes à partir de IDEFIX.

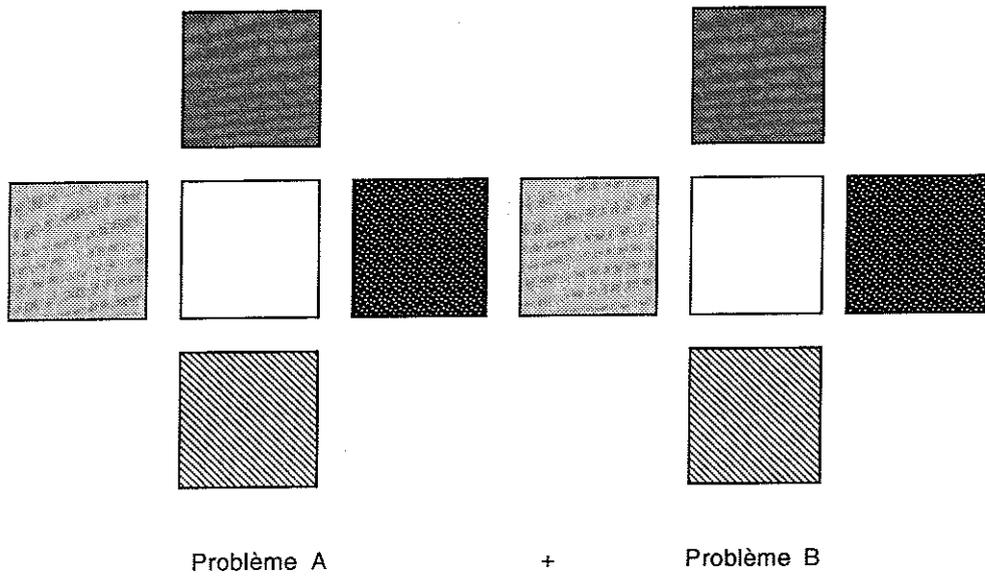
Ce sera le rôle du dernier chapitre de ce travail de formuler les spécifications, et dans certains cas d'ébaucher le développement de la solution, de l'application de IDEFIX à deux problèmes faisant partie intégrante des préoccupations des équipes de recherche de la FUL :

- le problème de l'analyse des nuisances en un site donné, associant les ressources de la cartographie, des logiciels de calcul de la dispersion des polluants et du bruit, des systèmes experts
- le problème de la conception et de la gestion d'une station d'épuration, associant les ressources de la CAO, des systèmes experts, de la simulation.

Dans une perspective plus large, la capacité intégratrice de IDEFIX pourrait même être renforcée par la mise en oeuvre d'un double processus d'interfaçage :

- un interfaçage "horizontal", intrasystème, analogue à celui élaboré dans ce chapitre
- un interfaçage "vertical", intersystèmes, mettant en communication deux ou plusieurs applications. Les concepts de la Programmation Orientée Objet permettent une réutilisation maximale de code (les classes d'objets) : on peut très bien imaginer qu'un même objet, par exemple un objet "bâtiment" ou un objet "rivière" puisse être utilisé dans différentes applications, éventuellement avec des points de vue ou des focalisations différents.

La figure 9.40 illustre le concept de double interfaçage.



= Problème A-B

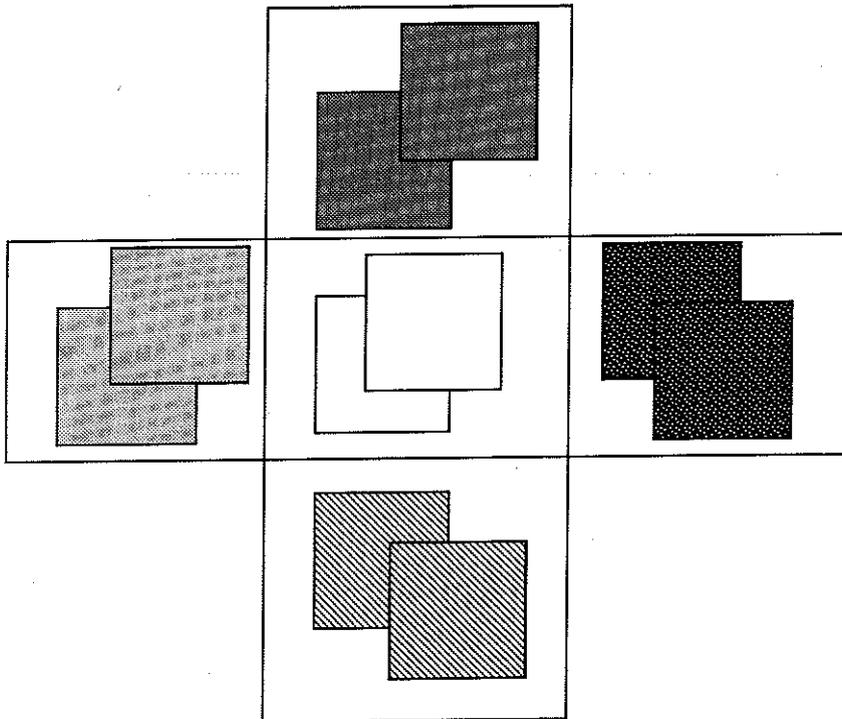


Fig. 9.40. Imbrication de deux problèmes environnementaux par double niveau d'interface au sein d'un système intégré

9.6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Fondamental dans la démarche de cette thèse, ce chapitre a tenté de montrer la pertinence et l'efficacité d'une approche intégratrice lors de la prise en charge d'un problème environnemental. Dans ce but, il a proposé une méthodologie d'intégration de ressources informatiques participant à la solution d'un problème concret et permettant de satisfaire un jeu de spécifications et de critères proposés a priori.

La méthodologie suggérée s'articule sur la définition d'une structure d'échange centrale, neutre par rapport aux intervenants, et sur le concept de module d'interfaçage pour les différents acteurs du système. Elle inclut également la conception d'un module d'arbitrage et de gestion des conflits fondé sur les techniques de l'analyse multicritère. Enfin, elle n'oublie pas le problème de la convivialité en incorporant le développement d'une interface-utilisateur souple et performante.

La démonstration du prototype du système s'opère sur un problème de conception "environnementale" de bâtiment. Utilisant au maximum les ressources présentées et analysées antérieurement dans ce travail, cette application revêt un caractère suffisamment exemplatif que pour aborder la palette de problèmes associés au mécanisme d'intégration.

Le caractère général de l'approche se trouve renforcé par la situation de la solution dans le contexte des Systèmes d'Aide à la Décision: Le concept IDEFIX trouve sa place dans cette famille de produits destinés préférentiellement à la problématique de l'environnement. Cette adéquation encourage l'application du concept à d'autres problèmes environnementaux. Ces applications font l'objet du chapitre suivant (et ultime) de ce travail.

CHAPITRE 10.

APPLICATIONS

10.1. INTRODUCTION

La dimension environnementale de ce travail ne pourra réellement être affirmée que lorsque le concept central de système intégré et la méthodologie sous-tendant son développement seront appliqués à des problèmes concrets relevant du contexte de la surveillance ou de la gestion de l'environnement.

Le chapitre précédent a jeté les bases de ces applications en dégagant des promesses légitimes quant au succès de l'adéquation de la méthodologie. Le concept IDEFIX semble à même de procurer l'outil nécessaire pour concrétiser ces espérances. Il reste maintenant à le démontrer.

Pour ce faire, ce dernier chapitre envisagera, comme annoncé, deux applications émergeant à des secteurs diversifiés de la problématique environnementale. Tout d'abord, le problème de l'analyse des nuisances en un site donné sera abordé suivant le point de vue de l'intégration des ressources. L'objectif de cette application réside dans l'obtention d'un outil permettant de juger de l'impact d'un certain phénomène d'origine anthropologique sur l'environnement, en ce compris différentes composantes le caractérisant.

Ensuite, une démarche analogue conduira à analyser la problématique de la gestion de stations d'épuration, ces opérations étant considérées en intégrant des ressources diverses permettant d'analyser la situation de façon globale.

Pour importante que soit la démonstration, ces applications alternatives ne seront évidemment pas menées aussi loin que celle traitant du problème de la conception de bâtiments. Il s'agit plutôt de définir les spécifications de ces problèmes afin de disposer, in fine, d'un cahier des charges précis permettant la mise en oeuvre immédiate des solutions proposées. Toutefois, la première de ces applications fera l'objet d'un rapide prototypage destiné à rassurer le lecteur sur le caractère réaliste de l'approche.

10.2. ANALYSE DES NUISANCES ENVIRONNEMENTALES

10.2.1. Introduction

Les activités de l'homme génèrent inévitablement un impact sur son environnement qui, lorsque l'intensité de cette activité s'accroît, peut se transformer en une réelle nuisance. En

fonction de l'activité envisagée, cette nuisance peut revêtir différentes formes. Elle peut affecter la santé dans son ensemble, y compris de manière insidieuse. Ses premières manifestations risquent le plus souvent de solliciter, au-delà d'un seuil de tolérance, les sens de l'individu : l'activité humaine produit du bruit, des odeurs, modifie la saveur de l'eau ou des aliments, transforme le paysage.

Ces dernières années ont vu naître la pression écologique qui se traduit par une conscientisation grandissante de l'opinion publique aux problèmes d'environnement. Les autorités ont réagi en imposant des normes plus restrictives aux activités industrielles d'une part, en exigeant une concertation préalablement à l'implémentation d'une nouvelle activité (du moins d'un certain type) d'autre part.

Cette nouvelle donnée de la problématique environnementale engendre la nécessité de disposer de méthodes et d'outils aptes à évaluer les conséquences d'une modification du "paysage environnemental" d'un site donné. La multiplicité des sources potentielles de pollution et des aspects de celle-ci a comme conséquence que l'utilisation d'un outil spécifiquement dévolu à l'une de ces composantes ne pourra suffire. Ici encore, une intégration des ressources pour une prise en compte globale de tous les aspects du problème s'impose.

Les paragraphes qui vont suivre vont tenter de cerner les ressources informatiques disponibles pour appréhender ce problème et de déterminer leur potentialité d'intégration. Le développement d'un premier prototype attestera du bien fondé de l'approche et permettra de jeter les bases d'une version plus complète du produit.

10.2.2. Analyse des ressources informatiques disponibles pour l'analyse des nuisances

Un problème d'analyse des nuisances suite, par exemple, à l'implantation d'une nouvelle activité anthropogénique, se situe par le fait-même en un site bien précis du territoire. Par conséquent, pour aborder un tel problème par voie informatique, il est nécessaire de disposer d'un outil permettant de représenter le terrain. Ce domaine a été abordé au chapitre 8 (Infographie) et met à la disposition de l'utilisateur, soit des logiciels de topographie, soit des logiciels plus élaborés de cartographie (incluant les premiers), soit encore des Systèmes d'Information Géographique. Ces derniers apparaissent probablement trop complexes pour cette application. Un bon logiciel de topographie, permettant la digitalisation d'un site, la représentation de ce site et des ouvrages qui y sont construits apparaît comme suffisant dans ce cadre-ci.

Dans un autre ordre d'idées, il apparaît nécessaire de disposer de moyens de calcul de l'impact des différentes nuisances : calculs de dispersion de polluants et d'odeurs, de transmission du bruit. Des logiciels existent dans ces deux catégories. Citons IMMPROG (AirInfo AG) pour la première catégorie et Raynoise (Numerical Integration Technologies) pour la seconde. L'impact esthétique d'une implantation apparaît par contre difficile à modéliser.

Ces modèles de prévision s'appuient généralement sur des données relatives aux substances mises en jeu, ou aux matériaux utilisés, ou encore aux caractéristiques du sol sous-jacent. Des informations concernant la densité de la population et sa répartition sont également susceptibles d'intervenir. En tout état de cause, des bases de données risquent rapidement de devenir nécessaires afin de contenir cette information.

Comme signalé ci-dessus, la conformité du niveau des nuisances ne peut se faire que par comparaison aux prescriptions d'une norme. Le processus de contrôle de cette conformité s'apparente par nature au déroulement d'une expertise et trouve dans la technologie des Systèmes Experts un outil adéquat pour être transcrit sur support informatique.

Ces considérations cernent les besoins pour la réalisation d'une approche intégrée du problème de l'analyse des nuisances :

- un logiciel de description du terrain et de son aménagement
- des bases de données : substances, populations, ...
- des modèles de calcul dans le domaine des odeurs, du bruit,...
- des systèmes experts dans le domaine des normes,...

Cet énoncé jette les bases des spécifications d'un système intégré dans le domaine de la prévision des nuisances.

10.2.3. Intégration des ressources

L'expérience acquise dans le développement de IDEFIX - conception des bâtiments a bien entendu largement influencé cette nouvelle application. L'architecture logicielle utilisée correspond à celle représentée par la figure 9.6 et la méthodologie de développement a suivi des étapes identiques : sélection des logiciels à intégrer, développement de la structure d'échange de données, développement des modules d'interface et intégration de l'ensemble de ces éléments dans le système IDEFIX afin de bénéficier des caractéristiques qui seront communes à toutes les applications : l'interface-utilisateur, le module d'arbitrage et la procédure de co-résidence des logiciels.

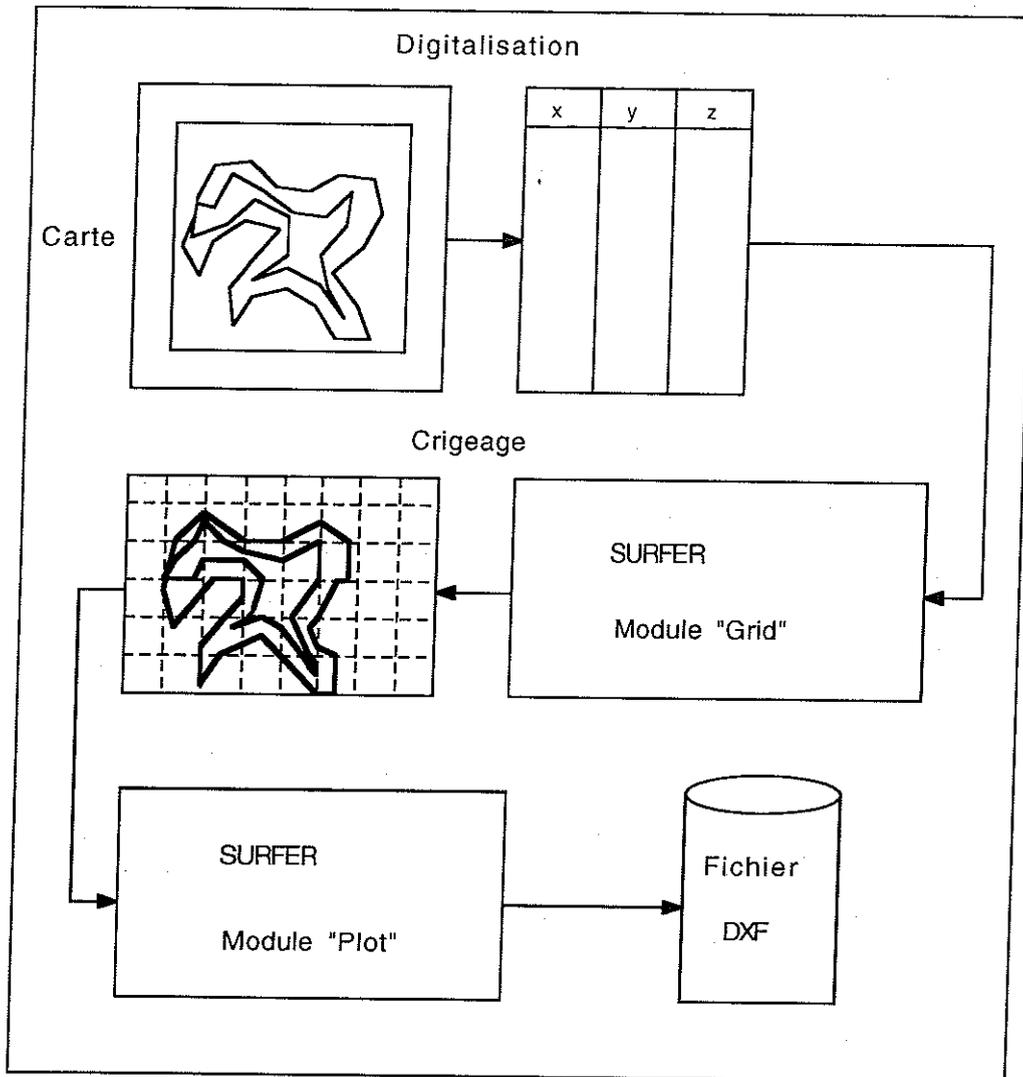


Fig. 10.1. Digitalisation d'une carte et traitement par un logiciel topographique

Dans une première approche, la démarche s'est restreint à étudier les possibilités d'interface, via une structure d'échanges des données, entre un logiciel de représentation topographique d'un site et un logiciel de calcul de la dispersion de polluants. Concrètement, en ce qui concerne le logiciel graphique, le choix s'est porté sur AutoCAD afin de bénéficier des acquis de l'application précédente. AutoCAD apparaît en effet apte à manipuler une représentation digitalisée d'une carte topographique, cette représentation résultant d'un travail préalable de digitalisation (au moyen d'une tablette à digitaliser par exemple) suivi, le cas échéant, d'un traitement par un logiciel spécifiquement dédié à la topographie (par exemple Surfer (Golden Software, 1989)) : krigeage et tracé des courbes de niveau. Ces opérations peuvent être

réalisées préalablement à l'utilisation du logiciel intégré proprement dit et, de plus, ne devront être répétées qu'une seule fois pour un site donné et pour toute une série de calculs donnés (dispersion, bruit, odeurs). Il est permis d'imaginer en effet que, dans un proche avenir, la cartographie complète d'un territoire sera disponible sous forme numérique et accessible à tout un chacun, comme le sont aujourd'hui, les cartes de l'Institut Géographique National. Par conséquent, l'ensemble des opérations représentées par la figure 10.1 ne fait pas partie des spécifications propres du logiciel intégré.

Il est seulement supposé que cette procédure produit un fichier, arborant par exemple le format standard DXF, qu'il est alors possible d'importer dans un outil général de conception graphique tel que AutoCAD.

Pour le logiciel d'analyse des nuisances, le choix s'est porté sur le programme "Immprog" déjà évoqué au chapitre 5 (voir 5.6) et qui réalise le calcul, au moyen d'un modèle gaussien, de la dispersion spatiale des immissions de polluants consécutives aux émissions de sources pouvant présenter un caractère ponctuel (cheminée d'usines par exemple), linéaire (une voie de circulation) ou encore confiné (rue en canyon par exemple). Les immissions calculées peuvent l'être en des points individuellement sélectionnés, alignés sur des profils ou faisant partie d'une grille à deux dimensions. Pour réaliser ce calcul, le programme tient compte de la nature du polluant (NO_2 , NO_3 , SO_2 , CO_2 , poussière), des données météorologiques et, éventuellement, topographiques du site, des considérations relatives à la pollution de fond, à l'altitude de la couche d'inversion, à la concentration d'ozone.

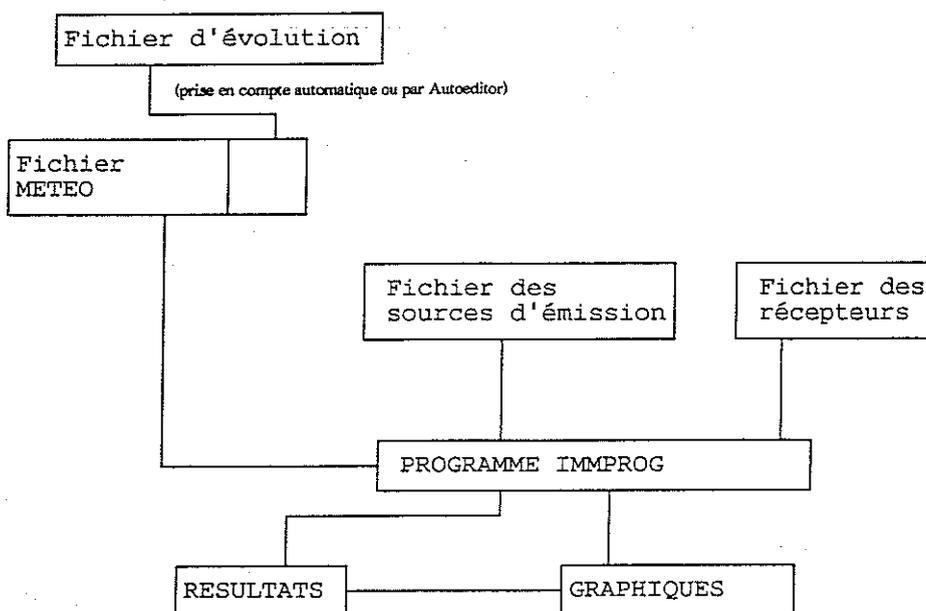


Fig. 10.2. Structure du logiciel Immprog (d'après Air Info AG, 1992)

Enfin, le logiciel dispose de sorties graphiques permettant la visualisation instantanée des résultats du calcul. La figure 10.2 représente schématiquement la structure du logiciel.

Les spécifications des logiciels à interfacier ont déterminé le choix des classes d'objets à définir au sein de la Structure d'Echange des Données. Tout d'abord, il est apparu qu'un certain nombre de classes, déjà définies pour l'application "bâtiment" pouvaient être réutilisées pratiquement telles quelles pour cette nouvelle application. C'est le cas des classes "site", "critère", "simulation", "outputs", "inputs", "expertise". Le cas échéant, une légère spécialisation de ces classes, pour mieux s'adapter à l'application en cours, peut être réalisée par un processus d'héritage. Cet aspect sera rediscuté plus loin (voir 10.4). Ensuite, des classes spécifiques ont été définies afin de caractériser principalement les émissions et immissions de polluants. Il s'agit des classes "Source Ponctuelle", "Source linéaire", "Source en canyon", "Récepteur individuel", "Profil de récepteurs", "Grille de récepteurs".

A titre d'exemple, voici une image des spécifications de la classe "Source ponctuelle" (psource) et de la classe "profil de récepteurs" (lreceptor) :

Source ponctuelle:

psource = object (generic)

[la classe "psource" hérite de la classe "generic", définie au chapitre 9]

PROPRIÉTÉS INRINSÈQUES

x	: real;	[coordonnée x de la source]
y	: real;	[coordonnée y de la source]
z	: real;	[coordonnée z de la source]
height	: real;	[hauteur de la source par rapport au sol]
émission	: real;	[quantité émise]
diameter	: real;	[diamètre de la cheminée]
velocity	: real;	[vitesse d'éjection]
flow	: real;	[débit volumique]
deltat	: real;	[différence de température]
sigma	: real;	[paramètre de dispersion initial]
dust-speed	: real;	[vitesse de déposition des poussières]
pollutant	: string;	[type de polluant]

PROPRIÉTÉS ACTIVÉES

constructor init;

[constructeur de la classe]

function exist;

[test logique d'existence d'une instance]

Profil de récepteurs:

lreceptor = object (generic)

[la classe "lreceptor" hérite de la classe "generic", définie au chapitre 9]

PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES

xa	: real;	[coordonnée x d'une extrémité du profil]
ya	: real;	[coordonnée y d'une extrémité du profil]
za	: real;	[coordonnée z d'une extrémité du profil]
xb	: real;	[coordonnée x de l'autre extrémité du profil]
yb	: real;	[coordonnée y de l'autre extrémité du profil]
zb	: real;	[coordonnée z de l'autre extrémité du profil]
length	: real;	[longueur du profil]
height	: real;	[hauteur des récepteurs par rapport au sol]
distance	: real;	[distance entre récepteurs]
receptors	: integer	[nombre de récepteurs sur le profil]

PROPRIÉTÉS ACTIVÉES

constructor init;
function exist

[constructeur de la classe]
[test logique d'existence d'une instance]

Une démarche identique a été mise en oeuvre pour toutes les classes définies ci-dessus et l'ensemble de ces classes et de celles définies antérieurement constitue la représentation orientée objet du système "dispersion de polluants".

Le développement des modules d'interfaçage ("drivers") a procédé de la même façon que pour l'application "bâtiment" (voir 9.3.3). Le driver pour AutoCAD s'est vu nanti de procédures permettant d'interpréter des objets de type "source" et "récepteurs" placés sur un fond topographique donné. La fonctionnalité spécifique de ce driver reste la création, dans la Structure d'Echange Centrale, des objets associés aux objets graphiques introduits par le logiciel de CAO. Cette opération se déroule de manière identique à celle décrite en 9.3.3.2 : placement des objets dans le dessin; extraction des attributs du dessin vers un fichier ASCII; lecture de ce fichier par le driver d'AutoCAD et instanciation des objets détectés dans la Structure Centrale. La figure 10.3 illustre cette procédure pour le placement d'une source de NO₂, de trois sources de SO₂ et d'un récepteur ponctuel..

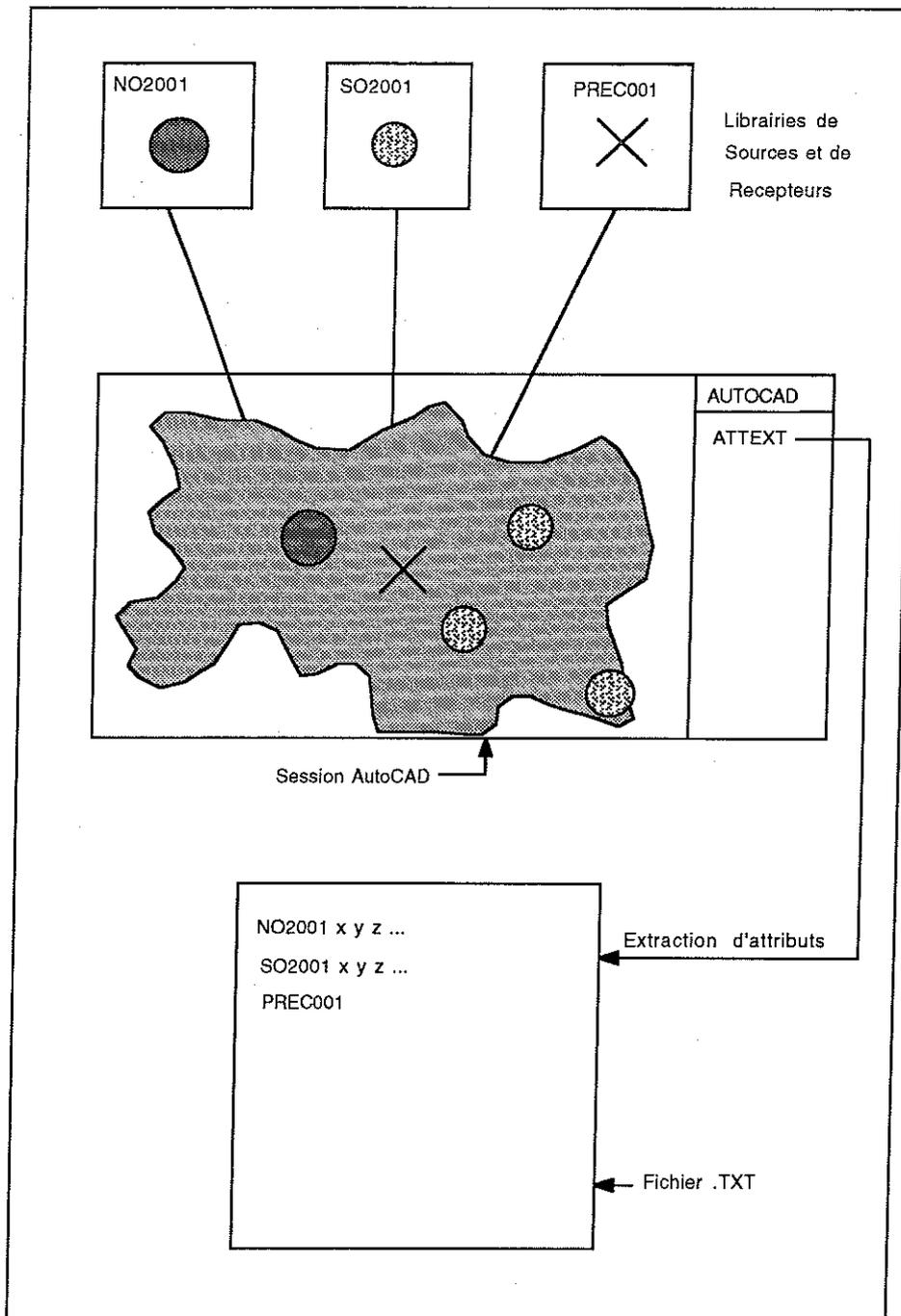


Fig. 10.3. Représentation d'une situation des pollutions à étudier et extraction des attributs vers un fichier ASCII

L'information qui est véhiculée par l'opération d'extraction des attributs se décompose de la façon suivante :

- Nom de la source ou du récepteur
- Coordonnées en x, y, z
- Hauteur sur sol

Pour les récepteurs :

- Facteurs d'échelle en x (pour les profils et les grilles de récepteurs) et en y (pour les grilles de récepteurs)
- Distance entre récepteurs (pour les profils et les grilles)

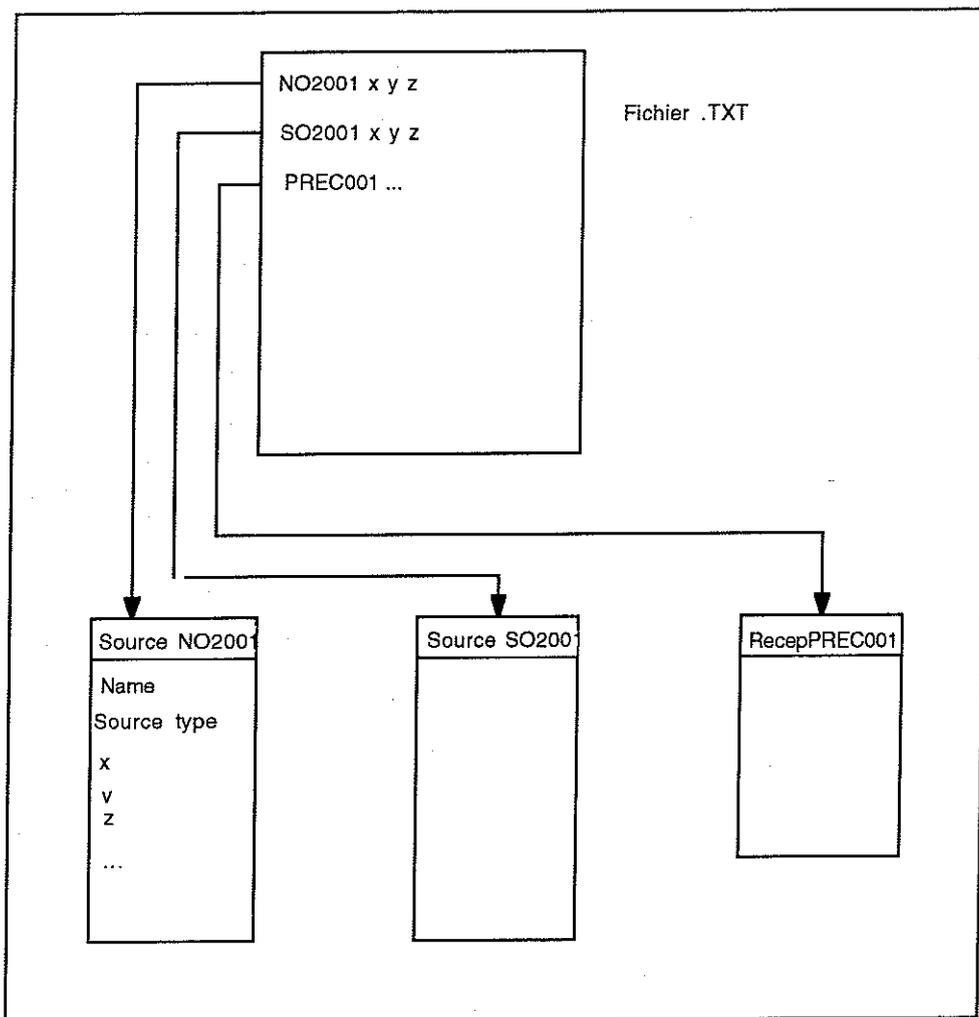


Fig. 10.4. Création des objets à partir du fichier ASCII issu de l'opération d'extraction des attributs

Pour les sources :

- Quantité émise
- Vitesse d'éjection
- Débit volumique
- Différence de température
- Vitesse de déposition des poussières
- Type de polluant

A partir de cette information, les objets de classe "Source Ponctuelle", "Source Linéaire", "Source en Canyon", "Récepteurs individuels", "Profil de récepteurs" et "Grille de récepteurs" peuvent être créés et nantis, au moment de leur instanciation, de la valeur adéquate de leurs attributs. La figure 10.4 représente schématiquement ces opérations. Associée à la figure 10.3, elle montre le processus complet de dessin dans AutoCAD et de transfert d'informations vers la structure d'échange de données centrale.

A ce stade de l'étude, le transfert d'informations dans le sens inverse n'a pas été envisagé. Il ne correspond d'ailleurs pas à une nécessité essentielle dans l'optique d'analyse donnée à l'utilisation du logiciel.

Une philosophie identique a présidé au développement de l'interface pour le logiciel "Immprog". Les fonctionnalités spécifiques de cet interface résident dans la création, à partir de l'information contenue dans la structure centrale, des différents fichiers nécessaires à l'exécution d'un calcul de dispersion et au renvoi dans cette même structure des résultats ou, à tout le moins, d'une référence vers les résultats de la simulation.

Structure centrale → Immprog ("PREPIP2")

Le logiciel "Immprog" requiert, pour son exécution, un certain nombre de fichiers dont certains peuvent être assignés à des grandeurs par défaut et d'autres sont même optionnels. Ainsi, les seuls fichiers réellement nécessaires sont :

- le fichier des sources, contenant une information sur la localisation et les caractéristiques des sources de pollution
- le fichier des récepteurs, contenant une information sur la localisation des récepteurs analysés
- le fichier météorologique
- le fichier des spécifications qui résume essentiellement la localisation des différents fichiers à prendre en compte pour le calcul.

Par ailleurs, les fichiers suivants peuvent être spécifiés mais peuvent aussi être remplacés par des valeurs par défaut fournies avec le logiciel :

- le fichier des évolutions des émissions : contenant une description de la variabilité temporelle des sources de pollution
- le fichier décrivant l'évolution de la concentration d'ozone
- le fichier décrivant l'évolution de la pollution de fond
- le fichier décrivant l'évolution de l'altitude de la couche d'inversion.

Enfin, les fichiers suivants apparaissent optionnels suivant la prise en compte ou non par le logiciel de l'information qu'ils contiennent :

- le fichier de description de la topographie
- le fichier de description de la rugosité.

Dans une première approche, le module d'interfaçage a été nanti de fonctions lui permettant de créer les fichiers des sources, le fichier des récepteurs (différent suivant la nature ponctuelle, linéaire ou "en grille" des récepteurs), le fichier météorologique et le fichier des spécifications de la simulation.

Immprog → Structure centrale ("POSTIP2")

Dans la direction inverse, la fonction du module d'interfaçage consiste essentiellement à créer, dans la structure centrale, les objets de type "simulation" et "outputs" et d'y introduire les informations relatives aux caractéristiques de la simulation à réaliser et aux résultats de celle-ci.

10.2.4. Spécifications d'un prototype

Le paragraphe précédent a présenté une ébauche de développement permettant de jeter les bases d'un logiciel intégré pour l'analyse des nuisances environnementales. A partir de ces développements, il est possible de donner les spécifications d'un prototype qui embrasserait plus largement le spectre des nuisances pouvant résulter d'une activité humaine localisée en un certain site. Un des objectifs associé à un tel système serait de constituer un support logiciel pertinent pour la réalisation d'études d'incidences en environnement, études qui deviennent de plus en plus courantes, parce qu'obligatoires dans certaines situations, dans notre pays.

Un examen attentif du contenu usuel d'une telle étude révèle qu'elle attache une attention particulière à la description du site concerné par l'incidence et que les domaines abordés émergent aux caractéristiques suivantes :

- Emission et immission, odeurs associées
- Bruit
- Impact paysager
- Impact sur le sol, le sous-sol, l'eau
- Aspect juridique (conformité au plan de secteur)
- Aspect humain

Cette liste présente assurément un caractère non limitatif : des domaines d'intérêt particulier peuvent s'y ajouter à la faveur de l'une ou l'autre étude spécifique.

Un système informatique destiné à servir de support logiciel à une telle étude se doit de prendre en compte tout ou partie des secteurs mentionnés. Par conséquent, un tel système devrait comprendre :

- un outil de description de site (logiciel graphique à base de CAO et permettant d'utiliser des cartes digitalisées et d'introduire les données relatives au site une seule fois pour les différents calculs, ou logiciel de cartographie ou encore Système d'Information Géographique)
- des outils d'évaluation des nuisances dans les domaines
 - d'immission de polluant et des odeurs associées
 - du bruit
 - de la pollution du sol, du sous-sol, des nappes, des cours d'eau

La prise en compte de l'impact paysager apparaît difficile à effectuer de façon informatisée. Néanmoins, un logiciel de type CAO pourrait permettre d'anticiper l'influence sur le paysage de l'implantation d'une usine ou d'un quelconque ouvrage anthropogénique. L'aspect juridique peut trouver dans les systèmes experts un outil efficace pour analyser la conformité de l'implantation avec les normes en vigueur. Les ressources cartographiques apparaissent quant à elles idéales pour aborder la problématique des plans de secteurs et de leur respect.

Enfin, une étude d'incidences requiert la mise à disposition de nombreuses données relatives à la météorologie, à la topographie, à la pollution "de fond". Des Systèmes de Gestion de Bases de Données semblent adéquats pour contenir et délivrer de telles informations.

Ces différentes considérations nous permettent de jeter les bases d'un prototype de logiciel intégré dédié à l'analyse des nuisances environnementales en un site donné. La figure 10.5 représente les différentes composantes de ce système et leur organisation autour de la structure d'échange de données.

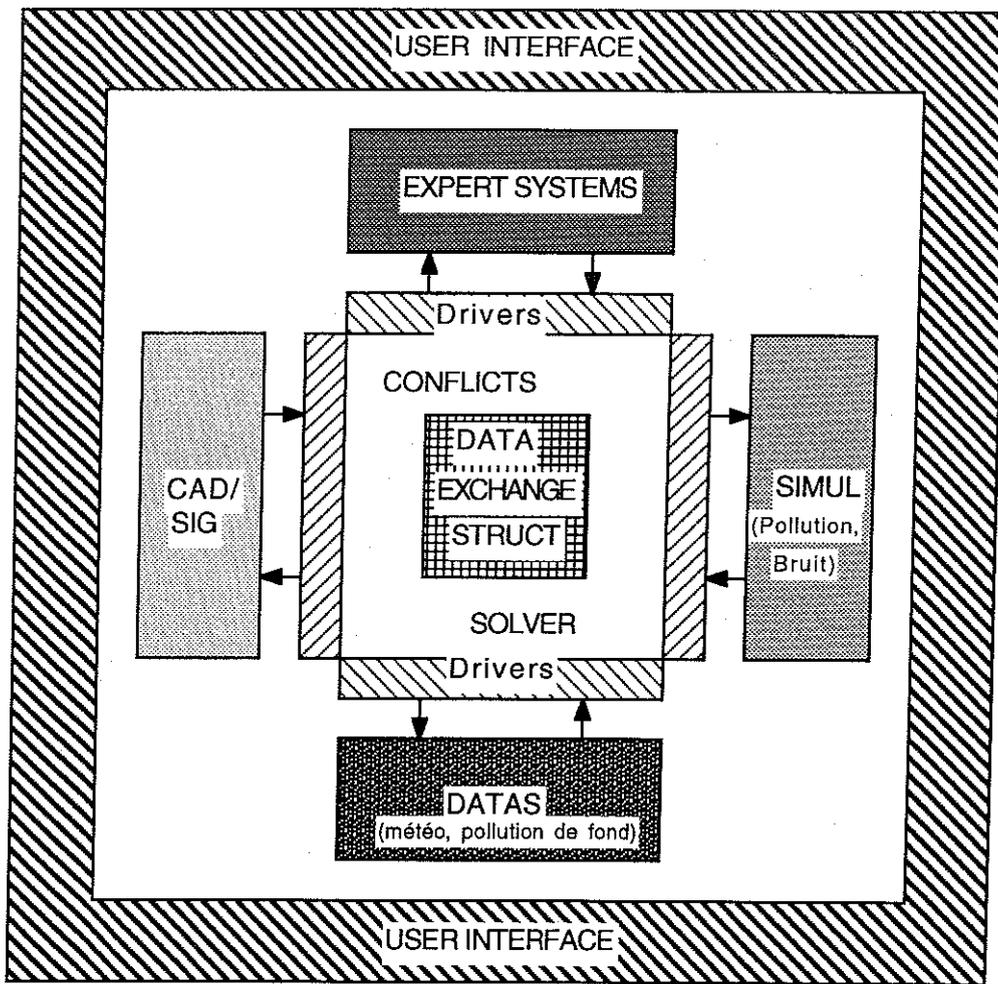


Fig. 10.5. Architecture d'un logiciel intégré d'analyse des nuisances environnementales

L'architecture de ce système est identique à celle présentée au chapitre 9 (voir figure 9.19) pour l'application "conception des bâtiments". Elle fait appel à une série de ressources déjà utilisées lors de cette première application : modules "FILE" et "EDIT", gestion du projet et analyse multicritère, interface-utilisateur. Elle s'en distingue par le choix des logiciels implémentés, les bases de données et les bases des connaissances attachées au système. L'utilisation du système ne diffère pas de celle en vigueur pour l'application "bâtiments". Les fonctionnalités disponibles à l'heure actuelle sont décrites au paragraphe suivant.

10.2.5. Utilisation du prototype

Eu égard aux développements présentés ci-dessus, la version actuelle du prototype ne comprend qu'un nombre restreint de fonctionnalités parmi celles envisagées pour le système complet. Le déroulement d'une session de travail s'opère de la façon suivante :

- Définition du projet, de la localisation, de la version actuellement en cours (fig. 10.6.a)
- Session de CAO : implémentation des sources de pollution et des récepteurs analysés (fig. 10.6.b)
- Session de simulation : calcul, par le logiciel Immprog, des immissions et/ou valeurs résultant des sources de pollution étudiées (fig. 10.6.c)
- Session d'évaluation : comparaison des différentes alternatives quant à la localisation des sources de pollution en utilisant l'analyse multicritère.

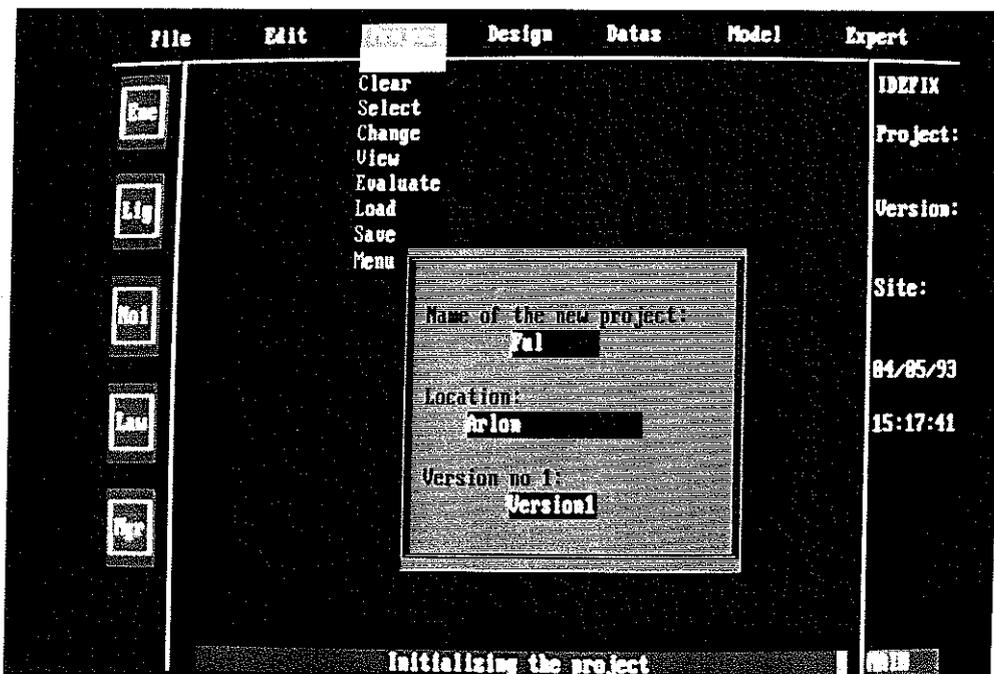


Fig. 10.6a. Utilisation de IDEFIX pour une analyse environnementale de nuisances: définition du projet

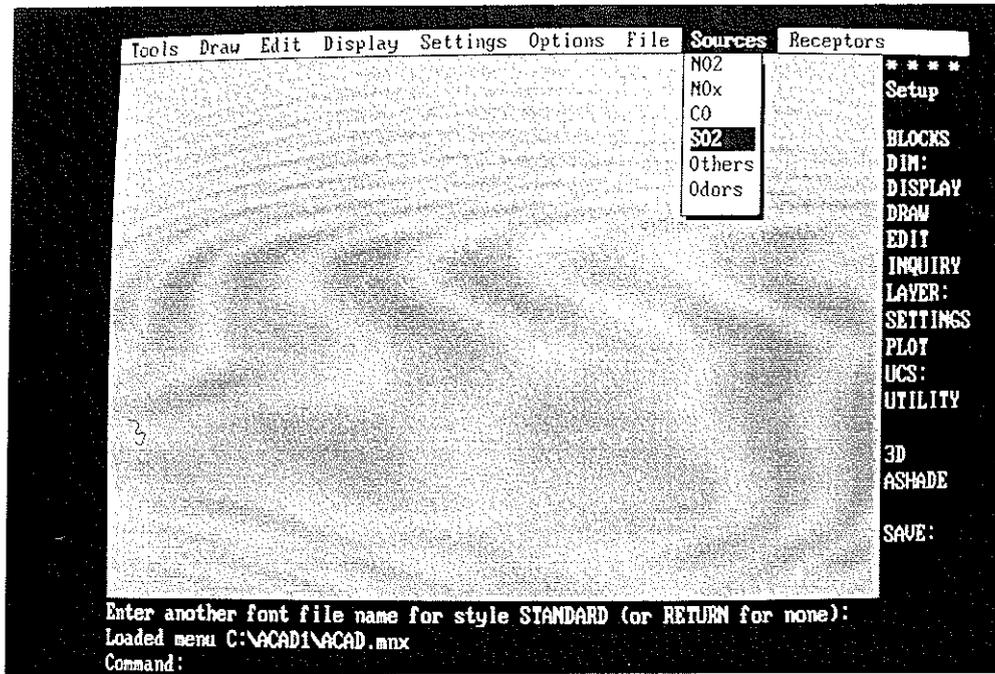


Fig. 10.6b. Utilisation de IDEFIX pour une analyse environnementale de nuisances: session de CAO

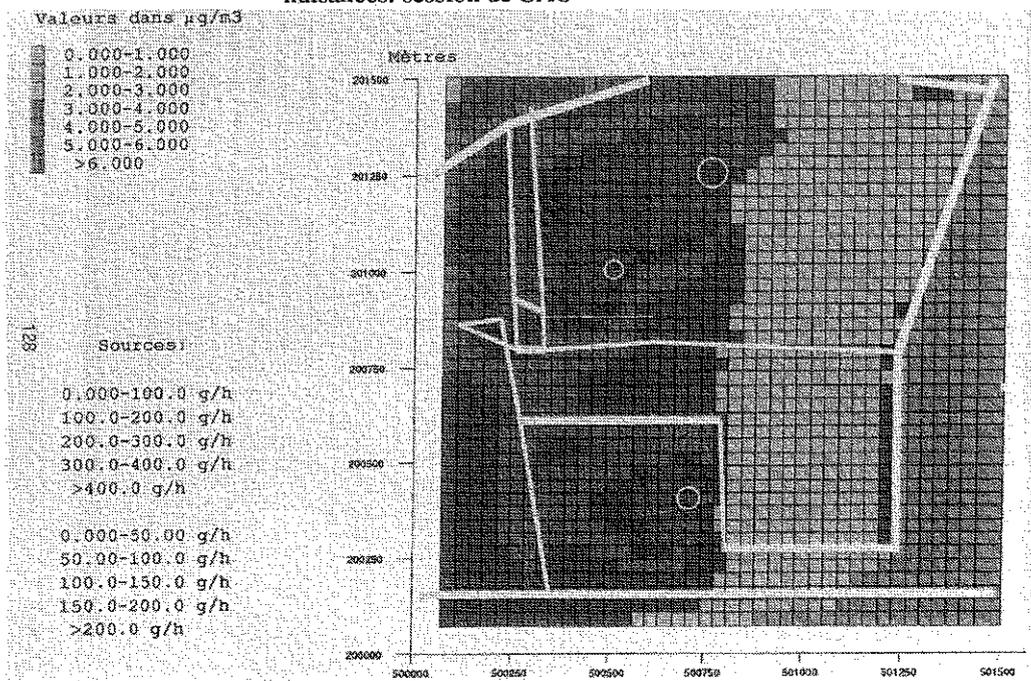


Fig. 10.6c. Utilisation de IDEFIX pour une analyse environnementale de nuisances: évaluation par Immprog.

10.3. GESTION D'UNE STATION D'ÉPURATION

10.3.1. Introduction

Le chapitre 9 a présenté l'application de IDEFIX à un problème de conception (design). Le paragraphe précédent a, quant à lui, examiné l'applicabilité du même concept à un contexte d'analyse. Ces deux problématiques apparaissent relativement proches dans la mesure où une situation donnée est proposée par l'utilisateur et analysée (évaluée) par le système. Dans une terminologie de système expert, ce type de problème correspond à une opération de "synthèse" et se résout en faisant appel à une stratégie basée sur le chaînage avant ("forward chaining") dans laquelle le système part du contexte pour élaborer une solution.

Ce paragraphe a pour objet de présenter l'application d'une démarche similaire d'intégration des ressources pour l'approche d'un problème de diagnostic (ou de contrôle). Toujours en adoptant la terminologie des Systèmes Experts, ce type de problème se résout en suivant la stratégie du chaînage arrière ("backward chaining") : le système part d'une solution éventuelle et détermine si le contexte actuel est compatible avec cette solution. Un tel problème de contrôle peut requérir l'utilisation d'un certain nombre de ressources informatiques complémentaires afin de générer des stratégies efficaces. Dans la mesure où l'utilisateur doit, lui, disposer d'un système centralisé et lui procurant une information la plus pertinente et la plus agrégée possible, l'intégration des ressources disponibles peut s'avérer indispensable afin d'éviter les incohérences et les incompatibilités entre les différents acteurs. Ce paragraphe a pour objet l'application d'une telle démarche à un problème de gestion particulier, celui de la gestion d'une station d'épuration. Cette problématique apparaît en effet de nature à mettre en oeuvre un certain nombre d'outils complémentaires et se pose en candidate adéquate pour tester la méthodologie. Elle correspond de plus à un besoin naissant au sein de la FUL et justifie le fait qu'une petite partie de cette thèse y soit consacrée.

10.3.2. Analyse des ressources informatiques disponibles

Les ressources informatiques actuellement disponibles pour aborder le problème de la gestion d'une station d'épuration se présentent actuellement sous la forme de modules individuels et dédiés à une tâche bien précise :

- calculs de bilans entrée/sortie
- gestion de l'aération
- gestion de la décantation
- essais de traceurs
- analyse des microorganismes

Ces modules se présentent sous la forme de programmes autonomes et requérant chacun l'introduction de données spécifiques. Toutefois, ils exigent également une quantité relativement importante de données en commun, ce qui justifie une approche intégratrice permettant de réduire au maximum ce travail et de procurer au gestionnaire un outil cohérent et compact.

Suivant le cas, ils pourront se présenter sous la forme de logiciels de simulation ou de systèmes experts. Les caractéristiques physico-chimiques des substances en jeu trouveront dans les bases de données un outil informatique efficace pour les représenter. Enfin, les ressources de la CAO pourront être mises à profit pour aider à une représentation graphique de la station et des processus la caractérisant.

10.3.3. Intégration des ressources

La démarche d'intégration doit nécessairement se situer dans le contexte de l'architecture logicielle proposée au chapitre précédent, en particulier du transfert de l'information circulant dans le système par une structure au format neutre. Cette application de type "contrôle" ou "diagnostic" engendre des conséquences sur le contenu de cette structure centrale. En particulier, l'application étant susceptible de tourner en temps réel, elle implique la nécessité de représenter quelque part dans le système la variable "temps" et de la mettre en relation avec la collection d'objets participant à la description du système à contrôler. Ceci pourrait se faire par la création d'un objet "temps" régulièrement mis à jour par une procédure accédant à l'horloge interne du système. En prise directe avec cette variable, le système à contrôler (la station d'épuration) sera décrit par des objets de façon à ce que la structure centrale, à un instant donné, représente l'état du système à ce même instant. Il est possible que certaines considérations proposées lors du développement du logiciel "Heating Expert" (voir ch. 7) pourraient trouver une application nouvelle ici. La figure 10.7 illustre de façon symbolique l'architecture du logiciel intégré, en particulier l'influence de la variable "temps".

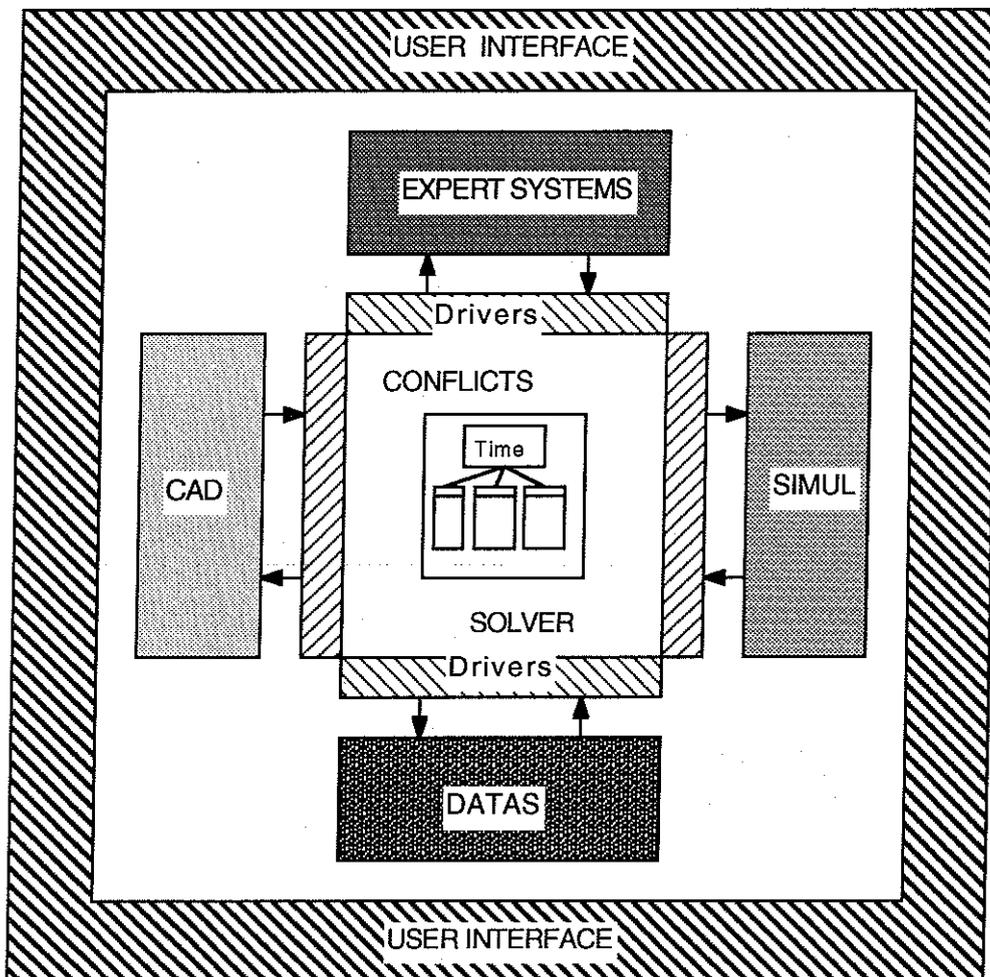


Fig. 10.7. Architecture d'un logiciel intégré de gestion d'une station d'épuration

10.3.4. Spécifications d'un prototype

A partir de la structure présentée à la figure 10.7, le cahier des charges d'un prototype de logiciel intégré d'aide à la gestion d'une station d'épuration devra prévoir les étapes suivantes :

- Choix des modules de gestion à implémenter parmi ceux proposés en 10.3.2. Suivant le cas, ces modules peuvent se présenter sous la forme de programmes de calcul ou de systèmes experts.
- Examen de la nécessité d'adjoindre au système une interface graphique basée sur la CAO.
- Sélection et développement de bases de données et de bases de connaissances à connecter au système.
- Développement de la structure centrale d'échange de données en prêtant une attention particulière à la variable "temps" et à sa mise en relation avec les autres variables du système.
- Développement des modules d'interfaçage entre les modules de gestion et la structure centrale. Sélection de critères à attacher aux différents modules en vue d'aider à la résolution des conflits, par analyse multicritère des différentes stratégies alternatives.
- Connexion des éléments cités ci-dessus sous le contrôle de l'interface-utilisateur de IDEFIX. Ce système devant fonctionner en temps réel, une attention particulière devra être portée aux caractéristiques de persistance et d'intégrité de la structure centrale, avec recours aux potentialités des Systèmes de Bases de Données Orientés Objets (OODB).

10.4. CONSÉQUENCES DE LA GÉNÉRALISATION

Par rapport aux considérations émises au chapitre précédent, la généralisation de la méthodologie à des problèmes environnementaux aussi différents ne manque pas d'induire un certain nombre de répercussions sur les caractéristiques du logiciel.

Tout d'abord, la réalisation d'un nombre croissant d'applications au départ d'une même architecture logicielle sera indéniablement favorisée si le système permet une réutilisation maximale du code développé. Il est par exemple important que l'interface-utilisateur du système soit totalement indépendante de l'application concernée. Les modules utilitaires doivent obéir à la même règle de transparence. Dans le cas d'IDEFIX, cela signifie que les fonctionnalités "Gestionnaire de fichiers", "Editeur de textes" et "Gestionnaire de projet" doivent demeurer non affectés par le changement d'application.

Par ailleurs, des applications de nature différente peuvent être amenées à manipuler des objets identiques mais avec un regard d'acuité variable. Par exemple, l'application "conception de bâtiments" considère l'objet "bâtiment" de façon approfondie alors qu'une application de type "aménagement urbanistique" ne nécessiterait qu'une description globale du même objet. Dans un système cohérent, il serait intéressant que les différentes vues d'un même objet, différentes entre elles par l'échelle du regard, soient liées entre elles par le système lui-même. En d'autres termes, le système devrait permettre de manipuler des vues de plus en plus spécialisées d'un même objet ou, au contraire, des vues de plus en plus générales ou globales. C'est dans cette perspective que l'on mesure la puissance et la pertinence de la Programmation Orientée Objet qui permet d'implémenter de façon directe les concepts réciproques de spécialisation et de généralisation par l'intermédiaire du processus d'héritage. Par exemple, cette opération a été réalisée pour les applications "conception de bâtiment" et "analyse des nuisances" pour l'objet de classe "simulation". Par rapport à une simulation de type "simulation thermique", un calcul de dispersion de polluants requiert certaines informations similaires mais également d'autres qui lui sont plus spécifiques. Ceci implique que certains attributs de la classe "simulation thermique" seront communs à ceux de la classe "calcul de dispersion" alors que d'autres seront propres à chacune des classes. L'implémentation en Programmation Orientée Objet permet de traduire cette double réalité en faisant hériter les deux classes d'un ancêtre commun, la classe "simulation" qui contient les attributs communs et en conférant aux classes descendantes les attributs spécifiques. La figure 10.8 représente schématiquement ce processus.

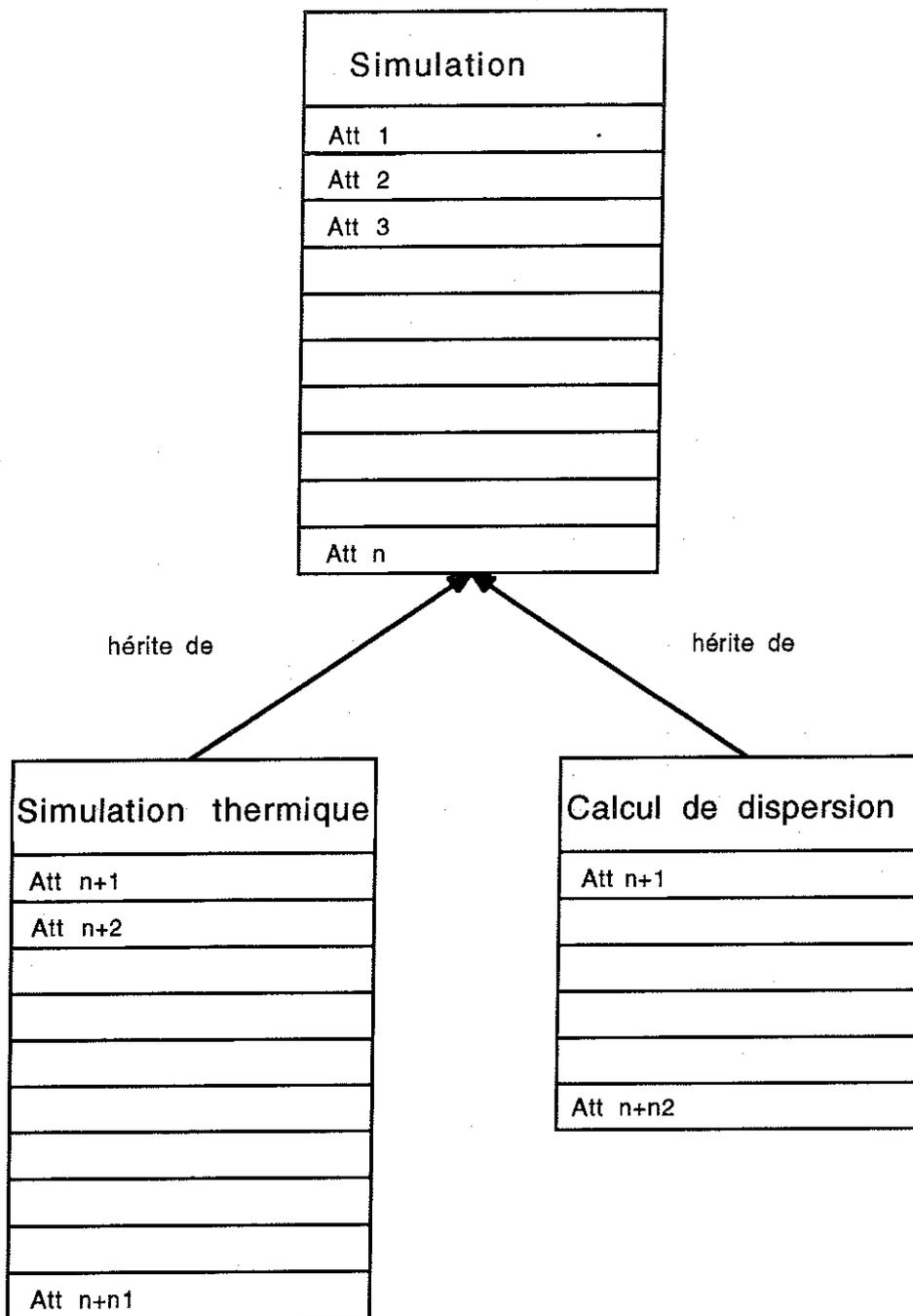


Fig. 10.8. Spécialisation d'une classe par processus d'héritage

10.5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

L'objet de ce chapitre était de montrer le caractère général de l'approche méthodologique proposée par l'application à deux exemples environnementaux distincts de celui envisagé au chapitre précédent : un problème d'analyse de nuisances se situant à une échelle moins "locale" que le problème de conception de bâtiments et un problème de gestion de station d'épuration impliquant une démarche de diagnostic en temps réel différant d'une stratégie de synthèse.

Même si le premier exemple ne débouche que sur un prototype aux fonctionnalités réduites et si le second ne dépasse pas le stade du cahier des charges, les deux exemples confirment la faisabilité de l'approche suivant ces deux axes de généralisation. Assurément, ces deux problèmes constituent deux voies qui mériteraient une exploration plus approfondie dans un travail postérieur à cette thèse.

La généralisation à des problèmes aussi différents ne manque pas d'induire des conséquences sur l'architecture du logiciel. Si elle confirme la nécessité de rendre une partie du code au maximum indépendante de l'application concernée, elle suggère également d'utiliser de façon intensive les richesses de la Programmation Orientée Objet, en particulier le processus d'héritage, de façon à rendre le code réutilisable de façon maximale. A ce prix, la transposition d'une application à l'autre devrait se traduire par un effort minimal de développement, ce qui est indispensable si on se réfère aux objectifs préalablement assignés à cette thèse.

CONCLUSIONS GENERALES

A l'heure de dresser le bilan d'un tel travail, il apparaît important de se souvenir des objectifs qui lui étaient préalablement assignés.

La thèse démontre avant tout le bien-fondé d'une approche intégratrice pour l'analyse et la résolution, par voie informatique, d'un problème d'environnement. Ce type d'approche permet en effet à la structure de l'outil développé et utilisé pour traiter le problème de s'identifier à la structure du problème lui-même en épousant ses caractéristiques complexe, pluridisciplinaire et multi-critère. Cette identification fournit aux décideurs un instrument dont le mode de travail correspond à son mode de pensée, correspondance qui ne signifie finalement rien d'autre que l'idée de convivialité.

Pour aboutir à cette conclusion majeure, le chemin à parcourir passait par l'examen approfondi des ressources informatiques utilisables par la méthodologie d'intégration. Pour les quatre catégories d'outils préalablement définies, le travail a tenté de situer la démarche sous-jacente à l'intégration dans un contexte théorique solide. C'est ainsi que la partie importante de la thèse consacrée aux logiciels de simulation a été amenée à examiner les disciplines fondamentales que constituent la mesure et la modélisation. De cette étude ressortent quelques considérations spécifiques, issues du contexte environnemental et concernant la particularité des mesures dans un tel milieu et la richesse de la panoplie des modèles développés. A l'interface entre les deux disciplines, la théorie des systèmes constitue à notre sens l'outil mathématique le plus adéquat pour traduire dans un formalisme clair et rigoureux toute la richesse et la complexité des problèmes relatifs à l'environnement. Cette théorie permet en effet d'agréger dans un langage unificateur des modèles mathématiques d'ordre et d'origine divers et d'y injecter les acquis de la mesure et de la modélisation par l'intermédiaire de techniques d'identification, si fécondes dans les domaines où l'empirisme prend encore souvent le pas sur la théorie. Ces potentialités ne doivent cependant pas faire oublier les précautions dont il convient de s'entourer dès lors que l'utilisateur manipule des systèmes de (très) grande taille et aux multiples interrelations présentant de surcroît un caractère non linéaire fréquent.

L'approche moins approfondie des autres disciplines informatiques a tout de même révélé leur caractère indispensable et leur applicabilité presque naturelle à dépeindre certains aspects des problèmes environnementaux. Que ce soient les systèmes de bases de données, les systèmes experts ou les logiciels de conception graphique, ils trouvent leur place dans toute démarche d'analyse et de résolution de ce type de problèmes. Leur gamme d'utilisations apparaît de plus suffisamment large que pour justifier leur présence dans tout système intégré.

La pertinence de l'approche intégratrice s'accompagne d'une démonstration des potentialités de la Programmation Orientée Objet. Celles-ci s'affirment dans la capacité de la technique à représenter de façon conceptuelle une certaine situation environnementale en traduisant de façon extrêmement compacte la complexité et le tissu de relations de cause à effet qui la

sous-tendent: le modèle-objet d'un système réel apparaît à même de suivre les évolutions de ce système et d'en retranscrire la structuration et la hiérarchie. De plus, le concept d'héritage permet de générer relativement facilement une application à partir d'une autre en permettant la réutilisation maximale du code développé.

En ce qui concerne les applications, la thèse présente trois exemples de concrétisation du prototype conceptuel IDEFIX, illustrations dont l'état d'avancement apparaît extrêmement différent d'une application à l'autre.

Tout d'abord, le prototype IDEFIX dédié à la conception de bâtiments se présente certainement comme le plus avancé. Quoi de plus normal puisque la problématique de la conception de bâtiments a servi d'exemple privilégié tout au long du travail. Même s'il apparaît déjà fonctionnel, le prototype souffre encore de nombreuses lacunes et imperfections qui ne remettent toutefois aucunement la méthodologie en cause mais requièrent avant tout un travail intense et parfois fastidieux de développement de code; et le travail de cette thèse s'est toujours refusé la livraison d'un produit "fini" comme objectif à atteindre.

A un niveau de développement inférieur, le prototype consacré à l'analyse de la dispersion de polluants a mis en évidence la relative facilité de transposition de l'approche vers un problème d'essence différente. Ce faisant, il a donné un éclairage nouveau aux capacités de la Programmation Orientée Objet en mettant en évidence la richesse de la notion d'héritage. Pour aboutir à un produit diffusable, ce prototype doit évidemment subir de nombreux développements mais ce travail déborde largement du cadre d'une thèse doctorale.

Enfin, la présentation du prototype dédié à la gestion automatique d'une station d'épuration ne dépasse pas le stade de la réflexion conceptuelle. Elle met toutefois en évidence une dimension particulière du problème liée à la caractéristique "en temps réel" de l'utilisation future de ce système. Ceci confère une ouverture supplémentaire à la gamme d'applications envisageables.

Les perspectives d'avenir de ce travail apparaissent avant tout orientées vers la mise à disposition de systèmes "finis" réellement utilisables. Dépassant le cadre strict de la recherche, cette évolution nécessite du développement de code en suivant les prescriptions proposées dans ce travail. L'orientation plus professionnelle caractérisant cette étape ultérieure n'exclut pas le choix d'un langage plus adéquat, par exemple C++, afin d'améliorer la souplesse et la portabilité du système. En tout état de cause, cette démarche s'inscrit de façon naturelle, à l'interface entre scientifiques et décideurs, dans la problématique de la Surveillance de l'Environnement.

NOMENCLATURE

a	Diffusivité thermique
a,b,c	Coefficients de pondération
a _{ij} ,b _{ij} ,c _{ij} ,d _{ij}	Coefficients d'un modèle dynamique
e	Epaisseur associée à un noeud
e	Séquence de bruit blanc
i,j	Indices de discrétisation spatiale
g	Coefficient d'échange globalisé
h	Coefficient de convection
k	Indice de discrétisation temporelle
n	Degré, ordre, dimension d'un système
n	Horizon de calcul de la commande optimale
p	Paramètres d'un système
q	Energie injectée à un noeud
s	Variable de la Transformée de Laplace
t	Température en degré Celsius
t'	Température résultante en degré Celsius
u	Variables d'entrée d'un système
v	Variables perturbatrices d'un système
v	Séquence stochastique sur l'état d'un système
w	Séquence stochastique sur la sortie d'un système
x	Variables d'état d'un système
x,y,z	Coordonnées spatiales
y	Variables de sortie d'un système
z	Variable de la Transformée en Z
z	Vecteur de mesures
z	Etat augmenté d'un système
A	Surface associée à un noeud
A,B,C,D,E,F	Matrices de la représentation d'état d'un système
A',B',C',D',E',F'	Matrices modifiées de la représentation d'état d'un système
A,B,H	Polynômes représentant un système dans le formalisme "z"
C	Capacité thermique associée à un noeud
F,G,H,I	Matrices de la représentation réduite d'un système
F _g	Facteur géométrique reliant le rayonnement global sur surface horizontale au rayonnement global sur une surface quelconque
F _{i,j}	Facteur de forme entre les surfaces i et j
F,Q,R	Matrices de pondération en commande optimale
G	Matrice d'inertie d'un système
H	Hamiltonien en commande optimale
J	Critère d'optimisation en commande optimale
J	Forme de Jordan
K	Matrice de gain
M	Matrice modale

P	Matrice de rotation en identification
P,Q,R	Matrices de variance/covariance dans le Filtre de Kalman
S	Rayonnement solaire global
T	Température absolue en Kelvin
T	Constante de temps d'un modèle dynamique
U	Coefficient d'échange thermique
V	Volume

Lettres grecques:

$\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \chi_{ij}, \delta_{ij}$	Coefficients d'un modèle dynamique
α	Coefficient d'absorption solaire
α^{Lw}	Coefficient d'absorption infrarouge
ϵ	Emissivité
ϵ	Séquence de résidus
λ	Coefficient de conductivité thermique
λ	Facteur d'oubli
λ	Multiplicateurs de Lagrange
ϕ	Flux de chaleur
ϕ	Vecteur de mesures
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ρ	Coefficient de réflexion solaire
ρ^{Lw}	Coefficient de réflexion infrarouge
ρc_p	Masse volumique x Chaleur spécifique
τ	Coefficient de transmission solaire
τ	Temps
Λ	Tenseur des conductivités thermiques

Indices:

a1,a2	air des zones 1 et 2
a	air de la serre
d	relatif au plancher
e	échange extérieur
ext	extérieur
g, ground	sol
H	horizontal
h, hall	relatif au hall du bâtiment
i	échange intérieur
m	relatif à la zone "réunions"
m	moyen
me	relatif au mur extérieur
mi	relatif au mur intérieur
mm	relatif au mur de masse
n	nord
0	initial, sur la frontière du domaine
occ	relatif aux occupants
p	relatif au plafond
roof	toiture
room	local adjacent au mur de masse
s	relatif à la serre
s	sud
s1,s2	structure (murs) des zones 1 et 2
sky	ciel
th	théorique
v	vitrage
v	par ventilation
ve	surface extérieure du vitrage
vi	surface intérieure du vitrage
w0	surface du mur de masse, côté serre
w1	noeud 1 du mur de masse
wj	noeud i du mur de masse
w _{n+1}	surface du mur de masse, côté auditoire
walls	parois du local adjacent au mur de masse
12	couplage entre zones 1 et 2

Conventions

Soulignement:	Grandeurs vectorielles
Double soulignement:	Grandeurs matricielles

BIBLIOGRAPHIE

- Abed, M., Silhadi, K. et M. Miramond. (1989). L'évaluation thermique dans un système de CAO. Bâtiment en phase avant-projet sommaire. Proceedings Computer Building Representation, Chexbres 89, 141-147.
- Abgrall, M. et J. Padet. (1982). Etude par différences finies du transfert de chaleur instationnaire dans un mur : évaluation des erreurs et choix d'un maillage. Revue Générale de Thermique, 252.
- Achard, G., Dufau, J. and M. Mommessin. (1991). Representation of knowledge in CONCEPTOR, a CAD system for buildings. Proc. 2nd International Workshop on Computer Building Representation for Integration, Aix-les-Bains, 35-42.
- Achard, G., Dufau, J., Mommessin, M. and G. Sauce. (1991). Building design with a multi-discipline CAD system using object-oriented environment. Proc. Building Simulation 91, 257-263.
- Achard, P. and R. Gicquel. (1986). European passive solar handbook. Commission of the European Communities, DG XII, Brussels.
- Anderson, B., Place, W., Kammerud, R.C. and M. Scofield. (1984). The impact of building orientation on residential heating and cooling. Energy and Buildings, 8, 205-224.
- André, Ph. (1988). The mass-wall as a passive heating concept. IEA Task XI Report, FUL.
- André, Ph. (1989a). Application of "MBDS" to a passive solar commercial building. Rapport BAG n° BA 890420-04, Université de Liège.
- André, Ph. (1989b). Présentation of a new project : development of an expert system for the computer aided design of buildings. Rapport BAG n° BA 890629-02, Université de Liège.
- André, Ph. (1989c). Parametric analysis of the building "Auditories FUL-Arlon. IEA Task XI report, FUL.
- André, Ph. (1990a). IEA Task XI. Advanced case studies "Auditories FUL Arlon". Final report. IEA Task XI report, FUL.
- André, Ph. (1990b). Proforma documentation. Model : mass wall. IEA 21 RN44/90, FUL.
- André, Ph. (1991a). Passive solar models : an integrating classification approach. IEA 21 RN/91, FUL.
- André, Ph. (1991b). Contrôle optimal des systèmes thermiques. Séminaire "Contrôle intelligent et gestion énergétique des bâtiments", FUL.

- André, Ph. (1991c). Building thermal models : an integrating classification approach. Proceedings IEA ECBCS Technical Briefing, Leuven.
- André, Ph. (1991d). Proforma documentation. Model : optimal controller. IEA 21 RN88/90.
- André, Ph. (1992a). Présentation du projet de thèse doctorale (révision). FUL.
- André, Ph. (1992b). Chauffage solaire passif : le bâtiment de la FUL à Arlon. Proc. Journée d'études "L'Energie et les bâtiments", Bruxelles.
- André, Ph. (1992c). MIS documentation. Program : MBDSA. IEA 21 RN/92, FUL.
- André, Ph. (1992d). Development of TRNSYS types for optimal thermal control. TRNSYS meeting, University of Liège.
- André, Ph. (1993a). IDSOFT : un logiciel d'estimation des paramètres des systèmes dynamiques par des méthodes d'identification des processus. FUL.
- André, Ph. (1993b). BMW : a database for architectural design. FUL.
- André, Ph. (1993c). TRNSYS as a component of an integrated software for building design. Trnsys meeting 1993, University of Liège.
- André, Ph. et J. Nicolas. (1992). Application de la théorie des systèmes à la thermique du bâtiment. Problèmes de modélisation, d'identification et de contrôle. Revue Générale de Thermique, 371, 600-615.
- André, Ph. and J. Nicolas. (1993). An integrated software for building design. Proc. conference "Building design, technology and occupant well being in cold and temperate climates", Brussels.
- André, Ph., Nicolas, J., Boreux, J.J., Debbaut, V., Geelen, J., Hanson, A. et J.F. Rivez. (1991c). Le bâtiment solaire passif de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise à Arlon. Plaquette réalisée par la Fondation Universitaire Luxembourgeoise et publiée avec le soutien du Ministère de la Région Wallonne.
- André, Ph., Nicolas, J. and B. Colson. (1993). Thermal comfort analysis in a passive solar building. Proc. conference "Building design, technology and occupant well being in cold and temperate climates", Brussels.
- André, Ph., Nicolas, J. and J.F. Rivez. (1990). Application of identification methods for the determination of heat exchange coefficients in a passive solar commercial building. Proc. ISES 89, Kobe, Japan, II, 1109-1113.

- André, Ph., Nicolas, J., Rivez, J.F. and V. Debbaut. (1991a). Analysis, monitoring and evaluation of a passive solar commercial building including mass walls and direct gain features : the "Auditoriums ful" building in Arlon (Belgium). Proc. ISES 91, Denver, USA, August 91, III, part I, 2682-2687.
- André, Ph., Nicolas, J., Rivez, J.F. and V. Debbaut. (1991b). Application of the optimal control theory for the definition of energy/comfort efficient strategies in a high thermal inertia passive solar commercial building. Proc. ISES 91, Denver, USA, August 91, III, part II, 3241-3246.
- André, Ph., Nusgens, P. et J. Portier. (1992a). Documentation accessible pour les modèles et les programmes de calcul, en physique du bâtiment. Journée d'études "L'Energie et les bâtiments, Bruxelles.
- André, Ph., Nicolas, J., Boreux, J.J., Debbaut, V., Geelen, J., Hanson, A. et J.F. Rivez. (1992b). Le bâtiment solaire passif de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise à Arlon. Chaleur et climats, 635, 2-8.
- André, Ph., Rivez, J.F. and J. Nicolas. (1987). Advanced Case Studies. Outline plan. IEA Task XI report TR1, FUL.
- Aström, K.J. (1983). Theory and application of adaptive control. A survey. Automatica, 19, 5, 471-486.
- Aström, K.J. and P. Eykhoff. (1971). System identification : a survey. Automatica, 7, 123-162.
- Aström, K.J. and B. Wittenmark. (1989). Adaptive control. Addison Wesley.
- Augenbroe, G.L.M. (1987). Research-Oriented Tools for Temperature Calculation in Buildings. Proc. System Simulation in Buildings 86, 234-255, Commission of the European Communities.
- Augenbroe, G.L.M. (1992). Integrated building performance evaluation in the early design stages. Building and Environment, 27, 2, 149-161.
- Augenbroe, G.L.M., Wilschut, P. and W. Rombouts. (1991). Making two building performance simulation tools to a product model testbed. Proc. Building Simulation 91, 375-384.
- Augenbroe, G.L.M. and F. Winkelmann. (1991). Integration of simulation into the building design process. Proc. Building Simulation 91, 367-374.
- Bacot, P. (1985). Identification de modèles de comportement des systèmes thermiques. Revue Générale de Thermique, 277, 15-21.

- Bacot, P., Neveu, A. et J. Sicard. (1984). Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, 267, 189-201.
- Badji, M. and D. Mallants. (1991). Integrating GIS and process models : a new perspective for decision support systems (DSS) in irrigation water management. *Proc. EGIS 91*, Bruxelles, 48-54.
- Baleynaud, J.M., Petit, M. and A. Trombe. (1991). Attached sunspace - Sensitivity factors. *Solar Energy*, 46, 3, 149-166.
- Bana e Costa, C.A. and Ph. Vincke. (1990). Multiple criteria decision aid : an overview. *Readings in multiple criteria decision aid*, Bana e Costa Editor, Springer Verlag, 3-14.
- Bauman, F., Andersson, B., Carroll, W.L., Kammeud, R. and N. Friedman. (1983). Verification of BLAST by comparison with measurements of a solar-dominated test cell and a thermally massive building. *Journal of Solar Energy Engineering*, 105, 207-216.
- Benard, C. (1986). Optimisation de la représentation réduite d'une paroi thermique. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 29, 4, 529-538.
- Benard, C., Boileau, E., Guerrier, B. and M.M. Rospei. (1987). Optimal control of a building as a function of meteorological conditions. *Proc. ICBEM 87*, IV, 439-446.
- Bigler, H. (1993). Documentation of the design support system SAM. Report on Projects dealing with Building Design Support Environments Ch. Hertkom Editor, IEA 21 RN331/93, 171-177.
- Björk, Bo-Christer (1989a). Issues in the development of a building product model standard. *International Workshop on Computer Building Representation 23-25 october 1989*, Chexbres, 177-197.
- Björk, B.-C. (1989b). Basic structure of a proposed building product model. *Computer-Aided Design*, 21, 2.
- Björk, B.-C. (1990). Issues in the development of a building product model standard. *Proc. Europa 90*, 372-391.
- Björk, B.-C. (1992). A unified approach for modelling construction information. *Building and Environment*, 27, 2 173-194.
- Björk, B.-C. and H. Penttilä. (1989). A scenario for the development and implementation of a building product model standard. *Adv. Eng. Software*, 11, 4, 176-187.
- Blake, J., Kalasinsky, C. et D. Seth. (1993). The building energy system analysis family of programs. Report on Projects dealing with Building Design Support Environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 45-54.

- Bledsoe, L.J. (1976). Linear and nonlinear approaches for ecosystem dynamic modelling. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 283-298, Academic Press.
- Bloem, J.J. (1990). The meaning of parameters in identification methodology in passive solar research. Proceedings of the workshop on "Advanced Identification Tools in Solar Energy Research", Ispra, November 1990, 139-144.
- Bloomfield, D. (1989). Calculation of energy and environmental performance of buildings. Amended Annex 21 Text. IEA 21 RR1/89.
- Bloomfield, D. (1992). IEA Annex 21 : Calculation of energy and environment performance in Buildings. IEA Buildings and Community Systems, Technical Briefing, Maastricht, November 1992.
- Bloomfield, D. and D.J. Fisk. (1977). The optimisation of intermittent heating. *Building and Environment*, 12, 43-55.
- Bloomfield, D. and Y. Jiang. (1990). A program documentation system and the work of IEA Annex 21. Proceedings "System Simulation in Buildings" Liège, 225-244.
- Boileau, E., Benard, C. et B. Guerrier. (1983). Comparaison de différentes approximations des fonctions de transfert d'une paroi thermique. *Revue Générale de Thermique*, 257, 391-404.
- Boling, R. H. Jr, Petersen, R.C. and K.W. Cummins. (1975). Ecosystem modeling for small woodland streams. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III, 183-204, Academic Press.
- Bonin, J.L., Butto, C., Dufresne, J.L., Grandpeix, J.Y., Joly, J.L., Lahellec, A., Platec, V. and M. Rigal. (1991). The ALMETH project ZOOM code : results and perspectives. *Proc. Building Simulation*, 91, 355-363.
- Borland. (1988). Turbo-Pascal. V.5.0 User's manual.
- Botkin, D.B. (1976). The role of species interactions in the response of a forest ecosystem to environmental perturbation. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 147-171. Academic Press.
- Bouchlagem, N.M. and K.M. Letherman. (1990). Numerical optimization applied to the thermal design of buildings. *Building and Environment*, 25, 2, 117-124.
- Brambley, M.R., Stratton, R.C. and M.L. Bailey. (1990). Integrating energy expertise into building design. *Proc. 5th International Conference on Systems Research, Informatics and Cybernetics*.

- Brambley, M.R., Chassin, D.P. and R.W. Quadrel. (1993). "US Department of Energy's "Advanced Energy Design and Operation Technologies" Project Prototype". Report on Projects dealing with Building Design Support Environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 27-43.
- Braun, Jim. (1984). TRNSYS Type 46 component. Multi-zone building dynamic simulation. Document BA 840716-01, University of Liège.
- Brylinsky, M. (1972). "Steady-state sensitivity analysis of energy flow in a marine ecosystem". *System Analysis and Simulation in Ecology*, 2, 81-101, Academic Press.
- Bryn, I. (1989). Energy information system on atrium design. Proceedings workshop "Expert Systems", Technical University of Denmark, Lyngby.
- Bryn, I. (1990). An energy information system for atrium design. *Sun at work in Europe*, 5, 4.
- Burns, P.J., Man, K. and C.B. Winn. (1991). Dynamic effects of bang-bang control on the thermal performance of walls of various construction. *Solar energy*, 46, 3, 129-138.
- Butler, P. and K.M. Letherman. (1980). A criteria for the accuracy of modelling of transient heat conduction in buildings. *Building and Environment*, 15, 143-149.
- Caccavelli, D., Hutter, E., Nibel, S. and P. Picard. (1991). Gas-fired heating plant management. *Proc. Building Simulation 91*, 169-174.
- Cadet International S.A. (1993). Génération de scénarios : Présentation du logiciel de simulation de collecte et de traitement de résidus urbains. Brochure publicitaire, Cadet S.A., France.
- CAMO. (1989). Cypros reference manual and user guide. Société CAMO.
- Carrara, G. and G. Novembri. (1990). Knowledge assistants in the process of architectural design. *Building and Environment*, 25, 3, 199-207.
- Caswel, H. (1976). The validation problem. *System Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 313-325, Academic Press.
- Chang, T.C. and C.W. Ibbs. (1990). Priority ranking. A fruzzy expert system for priority decision making in building construction resource scheduling. *Building and Environment*, 25, 3, 253-267.
- Chen, C.W. and G.T. Orlib. (1975). Ecologic simulation for aquatic environments. *System Analysis and Simulation in Ecology*, III, 475-588, Academic Press.

- Child, G.I. and H.H. Jr Shugart. (1972). Frequency response analysis of magnesium cycling in a tropical forest ecosystem. *System Analysis and Simulation in Ecology*, 2, 103-135, Academic Press.
- Christensen, J.E. and K. Johnsen. (1991). Third generation of a thermal simulation program : tsbi 3. *Proceedings ISES 91 Congress, Denver, USA*, 3, part I, 3139-3144.
- Clark, D.R. (1985). HVAC sim + Building systems and equipment simulation program reference manual. US Department of Commerce, NB5.
- Clark, D.R. and W.B. Jr. May. (1985). HVAC Sim + Building systems and equipment simulation program users guide. US Department of commerce, NBS.
- Clarke, J.A. (1986). Current status of the ESP system. *Proc. Int. Conf. System Simulation in Buildings*, 621-633, Liège.
- Clarke, J.A. (1988). The Energy Kernel System. *Energy and Buildings*, 10, 259-266.
- Coley, D.A. and J.M. Penman. (1992). Second order system identification in the thermal response of real buildings. Paper II : Recursive formulation for on-line building energy management and control. *Building and Environment*, 27, 3, 269-277.
- Colson, B. (1992). Etude du confort dans un bâtiment académique. Travail de fin d'études, ISI Pierrard, Année académique 1991-1992.
- Compagnon, R., Green, C. and J.L. Scartezzini. (1992). First developments of ADLINE : a link between a CAD program and daylighting design tools. *Sun at work in Europe*, 7, 1.
- Conrad, M. (1976). Patterns of biological control in ecosystems. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 431-456, Academic Press.
- Cordier, R. et J.M. Cousin. (1989). Réalisation d'un système expert d'aide à la conception des chaufferies collectives. *Revue Générale de Thermique*, n° 335-336, 712-716.
- Cotton, L. and P. Nusgens. (1990). MBDSA Users Guide. ATIC npa.
- Couwenbergh, J.P. (1990). L'indispensable pour AutoCAD. Ed. Marabout, Allier.
- De la Garza, J.M. and G.A. Oralkan. (1992). An object space framework for design/construction integration. *Building and Environment*, 27, 2, 243-255.
- De la Hunt, M.J. and L. Palmiter. (1985). Suncode-PC. A microcomputer version of SERIES. *Proceedings building energy simulation conference*, Seattle.
- De Larminat, Ph. et Y. Thomas. (1975). Automatique des systèmes linéaires. Tome 1 : Signaux et systèmes. Flammarion Sciences.

- De Larminat, Ph. et Y. Thomas. (1977a). Automatique des systèmes linéaires. Tome 2 : Identification. Flammarion Sciences.
- De Larminat, Ph. et Y. Thomas. (1977b). Automatique des systèmes linéaires. Tome 3 : Commande. Flammarion Sciences.
- Den Ouden, H. Ph. L. (1958). The measurement of air velocities. IG TNO Report n° 27.
- Dewson, T., Day., B. and A.D. Irving. (1993). Least squares parameter estimation of a reduced order thermal model of an experimental building. *Building and Environment*, 28, 2, 127-137.
- Dexter, A.L. (1981). Self-tuning optimum start control of heating plant. *Automatica*, 17, 3, 483-492.
- De Zeeuw, K. and H. Van Middelaar. (1991). Integrated use of remote sensing and hydrological modeling to assist in the hydrological description of the Province of Drenthe, The Netherlands. Proc. EGIS 91, Bruxelles, 1261-1270.
- Di Toro, D.M., O'Connor, D.J., and R.V. Thomann. (1975). Phytoplankton - Zooplankton - Nutrient Interaction Model for Western Lake Erie. *System Analysis and Simulation in Ecology*, III, 423-474, Academic Press.
- Dittrich, K.R. (1989a). Database technology for engineering applications : requirements and current development. Proc. Computer Building Representation, Chexbres 89, 251-261.
- Dittrich, K.R. (1989b). Object-oriented database systems : the next miles of the marathon. Proc. Computer Building Representation, Chexbres 89, 263-276.
- Doheny, J.G. and P.F. Monacham. (1987). Idabes : an expert system for the preliminary stages of conceptual design of building energy system. *Artificiel Intelligence in Engineering*, 2, 2, 54-64.
- Dolley, P.R., Martin, C.J. and D.M.J. Watson. (1993). The use of test rooms to determine the thermal performance of a transparently insulated opaque wall. *Building and Environment*, 28, 2, 139-143.
- Domange, P., Gregoire, E., Ledru, Y., Sintzoff, M. et P. Vandamme. (1989). Intelligence artificielle et systèmes experts. Formation continue des ingénieurs, Unité d'informatique, UCL.
- Dubois, A.M. (1991). Component model documentation and management the evolution of the proforma and modelathique. Proc. System Simulation in Buildings 90, Liège, 17-39.

- Dubois, A.M., Dufresne, J.L., Ebert, R., Grandpeix, J.Y., Joly, J.L., Lahelec, A., Laret, L., Lefebvre, G., Plazy, J.L. and P. Pottier. (1991). The model coupling problems : methods used in some building analysis tools and the ALMETH propositions. Proc. Building Simulation 91, 274-280.
- Duppenthaler, A. and R. Mantel. (1993). The integrated engineering systems. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 55-66.
- Eastman, C.M. (1991). The evolution of CAD : Integrating multiple representations. Building and Environment, 26, 1, 17-23.
- Erhorn, H., Stricker, R. and M. Sczerman. (1991). Software tools for the analysis. Proc. workshop "Field monitoring for a purpose", Göteborg (Sweden).
- Evans, P.M. (1990). Rule-based applications for checking standards compliance of structural members. Building and Environment, 25, 3, 235-240.
- Eykhoff, P. (1974). System identification. Parameter and state estimation. John Wiley and Sons.
- Eykhoff, P. and P.C. Parks. (1990). Identification and system parameter estimation : where do we stand now ?. Automatica, 26, 1, 3-5.
- Facet, Ltd. (1993). Description of project : CAD/Building services integration. Report on project dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 145-148.
- Faist, A., Hagen, F. and N. Morel. (1989). An expert system for passive and low energy building design. Proc. ISES congress 89, Kobe, Japan, 931-935.
- Fanger, P.O. (1972). Thermal comfort. Analysis and application in environmental engineering. Mc Graw Hill Book Company.
- Fasol, K.H. and H.P. Jörgl. (1980). Principles of model building and identification. Automatica, 16, 505-518.
- Fenves, S.J., Flemming, V., Hendrickson, C.T., Maher, M.L. and G. Schmitt. (1989). A prototype environment for integrated design and construction planning of buildings. Proc. Computer Building Representation, Chexbres, 29-41.
- Fenves, S.J., Flemming, V., Hendrickson, C.T., Maher, M.L. and G. Schmitt. (1990). Integrated software environment for building design and construction. Computer-Aided Design, 22, 1.

- Ferries, B. (1991). GSD project : use of NIAM method for synthesis of project of representation models. Proc. 2nd international workshop on Computer Building Representation for integration, Aix-les-Bains, 133-138.
- Fracastoro, G.V. (1990). The background for field studies. Workshop "Monitoring for a purpose, I, 17-26.
- François, C., Visier, J.C. and E. Hutter. (1991). Simplified building dynamic models : choice, formalisms and parameters catalogue. Proc. System Simulation in Buildings 90, 245-262, Liège.
- Gloennec, P.Y. (1991). Applications of fuzzy control for building energy management. Proc. Building Simulation 91, 197-202.
- Goicoechea, A., Hansen, D.R. and L. Duckstein. (1982). Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley and Sons, New-York.
- Golden Software. (1989). Surfer version 4 Reference Manual. Golden Software Inc, Golden, USA.
- Goodall, D.W. (1975). Ecosystem modeling in the desert Biome. System Analysis and Simulation in Ecology, III, 73-94.
- Gorez, R. (1979). Mathématiques appliquées. Cours FSA 2701, Louvain-la-Neuve.
- Green, C. (1989b). CAD and thermal design methods. Proc. Computer Building Representation, Chexbres 89, 157-167.
- Green, C. (19489). Scribe modeller-description of program and data structure. Proc. Computer Building Representation, Chexbres 89, 83-88.
- Gregoire, E. (1986). La représentation de la connaissance dans les systèmes experts. Congrès "Les systèmes experts dans l'informatique de demain, Liège.
- Hammarsten, S. and V. Norlen. (1987). An application of Kalman filtering to energy monitoring of buildings. Proc. of ICBEM, III, 245-252.
- Hammarsten, S., Van Hattem, D., Bloem, H. and R. Colombo. (1988). Passive solar components testing with identification methods. Solar energy, 41, 1, 5-13.
- Hastings, R. (1986). Proposed annex XI : Passive and hybrid solar commercial buildings. Annex statement and first resesarch plan. IEA Task XI Document.
- Hastings, Robert (1986). Ideals for an energy design tool on a personal computer. Proc. International climate architecture congress, Louvain-la-Neuve, 209-214.

- Hegetschweiler, W. (1987). Adaptive control of HVAC system. An overview. Proc. ICBEM 87, IV, 371-379.
- Hennuy, G., Laloux, A. et J. Patigny. (1978). Notes du cours de calcul numérique. FSA. UCL, Louvain-la-Neuve.
- Herron, D., Walton, G. and L. Lawrie. (1981). Building loads analysis and system thermodynamics (BLAST 3.0). User's manual. CERL-TR-E-171, US army construction engineering research laboratory, Champaign, Illinois.
- Hertkorn, C.A. (1991). Distributed knowledge bases as an integrated building system. Proc. Building Simulation 91, 479-484.
- Hertkorn, C. (1993). Documentation of design support system RETEX. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA-RN 331/93, 93-107.
- Hertkorn, Ch. (1993). Report on projects dealing with building design support environments. IEA Annex 21 Subtask D, IEA 21 RN 331/93.
- Hittle, D.C. (1979). The building loads analysis and systems thermodynamics (BLAST) Program, version 1.0. User's manual. Report n° CERL-TR-E-153, US army construction engineering research laboratory, Champaign, Illinois.
- Howard, H.C. and D.R. Rehak. (19489). Kadbse : Interfacing expert systems with databases. IEEE Expert, 65-76.
- Hubbel, S.P. (1971). Of sowbugs and systems : The ecological bioenergetics of a terrestrial isopod. Systems Analysis and Simulation in Ecology, I, 269-324, Academic Press.
- Hutter, E., Vaezi-Nejad, H., Dexter, A.L., Haves, P., Kelly, G., Nusgens, P. and S. Wang. (1991). The use of building emulation to evaluate the performance of building energy management systems. Proc. Building Simulation 91, NICE, 209-213.
- IEA Task XI. (1989). Basic case studies. ETSU, Harwell laboratory, Oxfordshire, UK.
- IEA Task XI. (1993). Source book of design insights. To appear.
- Innis, G.S. (1975). Role of total systems models in the grassland biome study. Systems Analysis and Simulation in Ecology, III, 13-47, Academic Press.
- INTERGRAPH OK. (1993). Report on Projects dealing with building design support environment, Ch. Hertkorn Editor, IEA21 RN 331/93, 163-169.
- Jacobsen, T. (1990). The use of numerical simulation of the physical system. Proc. workshop "Monitoring for a purpose", Göteborg, I, 137-143.

- Jansson, P.E. (1991). Soil water and heat model. Technical description. Department of soil sciences, Uppsala.
- Jones, G.E. (1989). AutoCAD applications. Scott, Foreman and Company, Glenview, USA.
- Jones, I.J. and G.E. Whittle. (1992). Computational fluid dynamics for building air flow prediction. Current status and capabilities. *Building and Environment*, 27, 3, 321-337.
- Jorgensen, O. (1983). Analysis model survey. IEA Task VIII, Subtask B Report.
- Judkoff, R.D. (1988). Validation of building energy analysis simulation programs at the solar energy research Institute. *Energy and Buildings*, 10, 221-239.
- Kelly, R.A. (1976). Conceptual ecological model of the Delaware estuary. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 3-45, Academic Press.
- Koenig, H.E. (1976). Human ecosystem design and management : A sociocybernetic approach. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 221-237, Academic Press.
- Kohonen , R. Laitinen, A., Aho, I., Madjidi, M. and W. Stephan. (1991). Study on optimal start, stop operation of hydraulic heating systems. *Proc. Building Simulation 91*, 175-186.
- Lakmazaheri, S. and W.J. Rasdorf. (1992). An artefact modeling approach for developing integrated engineering systems. *Building and Environment*, 27, 2, 209-220.
- Laret, L. (1980). Contribution au développement de modèles mathématiques simplifiés du comportement thermique transitoire de structures d'habitation. Thèse de doctorat en sciences appliquées, Université de Liège.
- Lassiter, R.R. and D.W. Hayne. (1971). A finite difference model for simulation of dynamic processes in ecosystems. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, I, 367-440, Academic Press.
- Lebru A. et J.C. Visier. (1987). Commande optimale d'un système de chauffage électrique d'un immeuble. Mise en oeuvre et expérimentation. *Proc. ICBEM 87*, IV, 390-398.
- Lefèbvre, G., (1989). Caractérisation de l'inertie thermique d'un bâtiment par analyse modale. *Revue Générale de Thermique*, 332-333, 501-512.
- Lefèbvre, G., Bransier, J. et A. Neveu. (1987). Simulation du comportement thermique d'un local par des méthodes numériques d'ordre réduit. *Revue Générale de Thermique*, 302.
- Letherman, K.M. (1977). A rational criteria for accuracy of modelling of periodic heat conduction in plane slabs. *Building and Environment*, 12, 127-130.

- Letherman, K.M., Palin, C.J. and P.M. Park. (1982). The measurement of dynamic thermal response in rooms using pseudo-random binary sequences. *Building and Environment*, 17, 1, 11-16.
- Levert, J.M., Dewosalle, C. et F. Benjellouin. (1993). Evaluation scientifique du risque industriel majeur. Journée d'études "Modèles mathématiques environnementaux", SRBII, Bruxelles.
- Lewis, P.T. and D.K. Alexander. (1990). "HTBZ : A flexible model for dynamic building simulation. *Building and Environment*, 25, 1, 7-16.
- Liebecq, G. (1988). Détermination des charges thermiques d'un bâtiment multizone en régime instationnaire. Thèse de doctorat, Université de Liège.
- Liebecq, G., (1989). About common features and differences in programs LPB-1, MBDS, TRNSYS Type 56. IEA-B/AN-21 Subtask A Building physics workshop, Liège, July 12.
- Liebecq, G. (1990). Instructions for preparation of a proforma. IEA 21 RN 43/90.
- Ljung, L. (1987). *System identification - Theory for the user*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ljung, L. and S. Gunnarsson. (1990). Adaptation and tracking in systems identification. A survey. *Automatica*, 26, 1, 7-21.
- Ljung, L. and T. Söderström. (1983). *Theory and practice of recursive identification*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Lugo, A.E., Sell, M. and S.C. Snedaker. (1976). Mangrove ecosystem analysis. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 113-145, Academic Press.
- Lutten, B., Wisten, B., Willems, P., Kuiper, P. and F. Tolman. (1992). Development and implementation of multilayered project models. Proc. 2nd International workshop on computer building representation for integration, Aix-les-Bains, 139-145, 1991.
- Madjidi, M. and W. Stephan. (1991). Computer simulation as a tool for the evaluation of an adaptive start/stop strategy for heating systems. *Proceedings System Simulation in Buildings 90*, 645-665.
- Madsen, H., Melgaard, H. and J. Holst. (1990). Identification of building performance parameters. *Proceedings of the workshop on "Advanced identification tools in solar energy research*, Ispra, 33-56.
- Maning, P. (1991). Environmental aesthetic design. *Building and Environment*, 26, 4, 331-340.

- Martin, C.J. and D.M.J. Watson. (1993). Empirical validation of the model SERI-RES using data from test rooms. *Building and Environment*, 28, 2, 175-187.
- Mc Leod, J. (1976). Simulating the world ecosystem. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 239-247, Academic Press.
- Michiels, L. (1992). L'Agence Internationale de l'Energie. Journée d'études "L'Energie et les bâtiments", Bruxelles.
- Miller, P.C., Collier, B.D. and F.L. Bunnell. (1975). Development of ecosystem modeling in the Tundra Biome. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*; IV, 95-115.
- Ministère de la Région Wallonne. (1987). Isolation thermique des logements neufs en Région Wallonne. Caractéristiques hygrothermiques des matériaux. Parois courantes : catalogue de coefficients K.
- Morck, O., Bryn, I., Morel, N., Siluestrini, G. and A. Santamaria. (1991). Integrated knowledge based solar design tool (Isolde). *Proceedings ISES 91 Congress*, Denver (Colorado, USA), 3491-3496.
- Morel, N. (1989). An object representation of the building. *Proc. Computer Building Representation*, Chexbres 89, 199-204.
- Morel, N. et F. Hagen. (1990). Aide à la conception thermique d'un bâtiment : un système expert pour architectes. *Actes EuropIA 90*, 122-129.
- Morel, N. and Hagen, F. (1991). Coupling expert systems to thermal calculation and simulation computer codes. *Proc. Building Simulation 91*, 473-478.
- Mulholland, R.J. and Sims, C.S. (1976). Control theory and the regulation of ecosystems. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. IV, 373-388, Academic press.
- Myers, L., Snyder, J. and L. Chirica. (1992). Database usage in a knowledge base environment for building design. *Building and Environment*, 27, 2, 231-241.
- Neirac, F.P. (1987). Méthode de réduction des modèles thermiques par agrégation et groupement de variables physiques. *Proc. ICBEM 87*, II, 194-201.
- Neveu, A., Bacot, P. et R. Regas. (1986). Modèles d'évolution thermique des bâtiments. Conditions pratiques d'identification. *Revue Générale de Thermique*, n° 296-297, 413-420.
- Ngendakumana, Ph. (1988). Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment et vérification expérimentale. Thèse de doctorat, Université de Liège.
- Nicolas, J. (1991). Un système expert de gestion thermique de bâtiments complexes. Séminaire "Contrôle intelligent et gestion énergétique de bâtiments", FUL.

- Nicolas, J. (1992). Méthodologie de la collecte d'information environnementale. Syllabus, FUL.
- Nicolas, J., André, Ph., Rivez, J.F. and V. Debbaut. (1990). An expert system for the real time control of a building heating plant. Proc. "System Simulation in Building 90". Liège.
- Nicolas, J., André, Ph., Rivez, J.F. and V. Debbaut. (1991). Use of an expert system for the real time control of a solar building. Proc. ISES 91, Denver, USA, 1726-1731.
- Norlen, V. (1990). Estimating thermal parameters of outdoor test cells. Building and Environment, 25, 1, 17-24.
- Norlen, V. and B. Eriksson. (1990). Identifying the heat flow equation for building components. Proceedings of the workshop on "Advanced identification tools in solar energy research, ISPRA, 27-31.
- Novakovic, V., Øgard, O. and H. Brustad. (1986). HVAC - Dynamic, a program system for simulation and emulation. Proceedings int. conference System Simulation in Buildings, Liège, 221-232.
- Nygaard-Ferguson, M. and J.L. Scartezzini. (1989a). Experimental performance of a predictive controller designed for passive solar buildings. ISES world congress Kobe, september 1989.
- Nygaard-Ferguson, M. and J.L. Scartezzini. (1989b). Computer simulation of an optimal stockastic controller applied to passive solar rooms. Energy and Buildings, 14, 1-7.
- Nygaard-Ferguson, M. and J.L. Scartezzini. (1989c). Stockastic models of free gains. ISES Solar world Congress, Kobe.
- Nygaard-Ferguson, M. and J.L. Scartezzini. (1991). Full scale experiment of a predictive controller in a passive solar building. Proc. ISES 91, III, part 2, 3318-3323.
- O'Brien, J.J. and J.S. Wroblewski. (1976). A simulation of the messascale distribution of the lower marine trophic levels off west Florida. Systems Analysis and Simulation in Ecology, IV, 63-110, Academic Press.
- Odum, H.T. (1976). Macroscopic minimodels of man and nature. Systems Analysis and Simulation in Ecology, IV, 249-280, Academic Press.
- Okuyama, H. (1990). System identification theory of the thermal network model and an application for multi-chamber air flow measurement. Building and Environment, 25, 4, 349-363.

- O'Neill, R.V. (1975). Modeling in the eastern deciduous forest biome. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III, 41-72, Academic Press.
- Opfergelt, D. (1983). Instrumentation in situ. Monitoring énergétique. CRA. Louvain-la-Neuve.
- Ouyang, K. and F. Haghigat. (1991). A procedure for calculating thermal response factors of multi-layered walls - State space method.. *Building and Environment*, 26, 2, 173-177.
- Ove Arup Partners. (1993). Documentation of design support system brans : Building environmental analysis system. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 131-141.
- Overton, W.S. (1975). The ecosystem modeling approach in the coniferous forest biome. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III, 117-138.
- Oxman, R.M. and R.E. Oxman. (1991). Formal knowledge in knowlege based CAD. *Building and Environment*, 26, 35-41.
- Ozenda, P. (1986). La cartographie écologique et ses applications. Edition Masson, collection "Ecologie appliquée et sciences de l'environnement", Paris.
- Parand, F. (1993). BRE's integrated building design and performance evaluation system. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 69-81.
- Parent, P. and P. Morand. (1987). Applications of optimal control theory to energy management systems. *Proc. ICBEM 87*, IV, 407-414.
- Park, C., Clark, D.R. and G.E. Kelly. (1986). HVAC Sim + Building systems and equipment simulation program : Building loads calculation. U.S. Department of commerce, NBS.
- Paruccini, M. (1992). Decision-support systems for environmental management. CEE Report EUR 14087 EN, Luxembourg.
- Patankar, S.V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Mc Graw-Hill book company.
- Patten, B.C., Egloff, D.A. and J.H. Richardson. (1975). Total ecosystem model for a cove in lake Texoma. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III, 205-421, Academic Press.
- Penman, J.M. (1990). Second order system identification in the thermal response of a working school. *Building and Environment*, 25, 2, 105-110.

- Pols, A.A.J. (1991a). Building representation for design integration. Proc. Building Simulation 91, 402-408.
- Pols, A.A.J. (1991b). Building representation : an integrated approach to building modelling. Second international workshop on Computer Building Representation for Integration, Aix-les-Bains, 146-155.
- Rabl, A. (1988). Parameter estimation in buildings : methods for dynamic analysis of measured energy use. Trans. of ASME, Jour. of Solar Energy Engin., 110, 52-66.
- Radford, A.D. and J.S. Gero. (1980). Trade off diagram for the integrated design of the physical environment in buildings. Building and Environment, 15, 3-15.
- Rehak, D.R. and H.C. Howard. (1985). Interfacing expert systems with design databases in integrated CAD systems. Computer-Aided Design, 17, 9.
- Rhoten, R.P. and R.J. Mulholland. (1974). Optimal regulation of non-linear plants. Int. J. Control, 19, 4, 707-718.
- Rittelman, P.R. and S.F. Ammed. (1985). Design tool survey. IEA Task VIII, Subtask C Report.
- Robin, C. and J. Brau. (1991). SETIS : an intelligent system for thermal design of buildings. Analysis, approach and problem about knowledge modeling. Proc. 2nd international workshop on Computer Building Representation for Integration, Aix-les-Bains, 119-132.
- Robin, C., Brau, J. and P. Deiecker. (1991). SETIS : an intelligent systems for building thermal design. Proc. Building Simulation 91, 449-456.
- Robinson, P. and J. Littler. (1993). Advanced glazing : outdoor test room measurements, performance prediction and building thermal simulation. Building and Environment, 28, 2, 145-152.
- Rosenman, M.A. (1990). Application of expert systems to building design analysis and evaluation. Building and Environment, 25, 3, 221-233.
- Rosenman, M.A. and J.S. Gero. (1985). Design codes as expert systems. Computer-Aided Design, 17, 9.
- Rosenman, M.A., Gero, J.S., Hutchinson, P.J. and R. Oxman. (1986). Expert systems applications in Computer-Aided Design. Computer-Aided Design, 18, 10.
- Rosset, M.-M. et C. Benard. (1986). Optimisation de la conduite du chauffage d'appoint d'un habitat solaire à gain direct. Revue Générale de Thermique, n° 291.

- Roulet, C.A. (1987). *Energétique du bâtiment*, 2 tomes. Presses Polytechniques romandes, Collection "Gérer l'environnement".
- Rutherford Appleton Laboratory. (1993). Description of project : Intelligent front end. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 157-162.
- Saila, S.B. (1972). Systems analysis applied to some fisheries problems. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, 2, 331-372, Academic Press.
- Salgon, J.J. and A. Neveu. (1987). Application of modal analysis to modelling of thermal bridges in buildings. *Energy and buildings*, 10, 109-120.
- Sanvido, V.E. (1992). Linking levels of abstraction of a building design. *Building and Environment*, 27, 2, 195-208.
- Scartezzini, J.L., Rey, D. and Th. Liebling. (1987a). Predictive control for back up auxiliary heaters in passive solar devices. *Proc. ICBEM 87*, IV, 415-422.
- Scartezzini, J.L., Faist, A. and Th. Liebling. (1987b). Using Markovian stochastic modelling to predict energy performances and thermal comfort of passive solar systems. *Energy and Buildings*, 10, 135-150.
- Scartezzini, J.L., Ferguson, M., Bottazi, F. and Th. Liebling. (1989). Possibilities and limitations of markovian models of passive solar buildings. ISES World Congress, Kobe. 1019-1023.
- Schmitt, G. (1989). Architectural preprocessor for engineering expert systems. *Proc. Computer Building Representation*, Chexbres 89, 43-54.
- Seth, D. (1989). Calculation of energy and environmental performance of buildings. A discussion paper on IEA Annex XXI. IEA 21 document.
- Sfaxi, Y. et M. Grignon. (1988). Modélisation d'une structure thermique par un nombre réduit de paramètres. Application à un local chauffé par dalle. *Revue Générale de Thermique*, 317, 304-307.
- Sicard, J., Bacot, P. et A. Neveu. (1985). Analyse modale des phénomènes thermiques dans le bâtiment. *Int. Journ. Heat and Mass Transfer*, 28, 1.
- Silverio, N. (1991). *Programmation orientée objet en Pascal*. Editions Eyrolles. Paris.
- Simes, J. (1990). *Evaluer l'impact sur l'environnement. Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne (Suisse).

- Söderström, T., Ljung, L. and I. Gustavsson. (1978). A theoretical analysis of recursive identification methods. *Automatica*, 14, 231-244.
- Sollins, Ph., Harris, W.F. and N.T. Edwards. (1976). Simulating the physiology of a temperate deciduous forest. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 173-218, Academic Press.
- Stevens, G. (1991). The impacts of computing on architecture. *Building and Environment*, 26, 1, 3-11.
- Stimson, K.R. (1993). Activated sludge control adviser. 6th IAWQ Workshop on ICA, Canada.
- Stordeur, A. (1990). La conception architecturale par ordinateur. *Bâtir et Entreprendre*, n° 1/90, 19-22.
- Strachan, P. (1993). Model validation using the PASSYS test cells. *Building and Environment*, 28, 2, 153-165.
- STU (Service technique de l'urbanisme). (1989). Informations géographiques : des inventaires aux systèmes. Editions du STU, Ministère de l'Équipement et du logement. Paris.
- Ta-Luft. (1986). Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Heymanns Verlag, Köln.
- Tischer, M. (1990). La bible Turbo-Pascal. Editions Micro-Application. Paris.
- Turban, E. (1990). Decision support and expert systems. Mac Millan publishing company. New-York.
- Turner, J.A. (1992). Conceptual modeling applied to computer-aided architectural design. *Building and Environment*, 27, 2, 125-133.
- University of Wisconsin-Madison. (1988). TRNSYS. A transient system simulation program. TRNSYS 12.2. Reference manual.
- University of Wisconsin-Madison. (1990). TRNSYS. A transient simulation program. TRNSYS 13.1. Reference manual.
- Vaezi-Nejad, J., Hutter, E., Haves, P., Dexter, A., Kelly, G., Nusgens, P. and S. Wang. (1991). The use of building emulators to evaluate the performance of building energy management systems. *Proc. Building Simulation 91*, 209-213.
- Van Dijk, H. and G.P. Van der Linden. (1993). The PASSYS method for testing passive solar components. *Building and Environment*, 28, 2, 115-126.

- Van Doninck, T. (1993). Intelligent building input for performance simulation. Report on projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 83-92.
- Van Twembeke, U.L. (1989). Nature et conception d'une cartographie écologique. Bulletin trimestriel de la société belge de photogrammétrie-télé-détection et cartographie, n° 175-176, 3-17.
- Visier, J.C., D'Acromont, E., Nibel, S., Caccavelli, D., Hutter, E., Vinot, B. and P. Picard. (1991). Heating control strategies in non-permanently occupied buildings. Proc. System Simulation in Buildings 90, 667-685. Liège.
- Wade, J.W. (1992). Essential typologies for the constructions industry. Building and Environment, 27, 2, 117-124.
- Waide, J.B. and J.R. Webster. (1976). Engineering system analysis : applicability to ecosystems. Systems Analysis and Simulation in Ecology, IV, 329-371, Academic Press.
- Walsh, J.J. and S.O. Howe. (1976). Protein from the sea : a comparison of the simulated nitrogen and carbon productivity of the pern upwelling ecosystem. Systems Analysis and Simulation in Ecology, IV, 47-61, Academic Press.
- Wang, S. (1990). Comparing and translating HVAC Sim + components for TRNSYS. European TRNSYS club, Liège.
- Wang, S. (1992). Emulation and simulation of building, HVAC systems for evaluating the building energy management system. Ph D Thesis, University of Liège.
- Wang, S. and J. Lebrun. (1991). Simulation and emulation of HVAC System and BEMS. International symposium on heating, ventilation and air conditioning, Tsinghua HVAC 91, Beijing.
- Wang, S., Lebrun, J. and P. Nusgens. (1992). Evaluation and emulation of building energy management systems. IEA Conference on "Next generation technologies for efficient energy end user and fuel switching" Dortmund.
- Waters, J.R. and A.J. Wright. (1985). Criteria for the distribution of nodes in multilayer walls in finite-difference thermal modelling. Building and Environment, 20, 151-162.
- Webster, C.J. and C.N. Omare. (1991). A formal approach to object oriented spatial database design. Proc. EGIS 91, Bruxelles, 1209-1218.
- Wiederhold, G. (1977). Database design. Mc Graw Hill Company.

- Wiegert, R.G. (1975). Simulation modeling of the algal-fly components of a thermal ecosystem : Effects of spatial heterogeneity, time delays and model condensation. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III, 157-181, Academic Press.
- Willan, U. (1993). The logo CAD concept for building design. Report on Projects dealing with building design support environments, Ch. Hertkorn Editor, IEA 21 RN 331/93, 121-127.
- Williams, F.M. (1971). Dynamics of microbial populations. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, I, 197-267, Academic Press.
- Wiltshire, J., Lockley, S. and A. Wright. (1989). Building representation for energy design. *Proc. Computer Building Representation*, Chexbres 89, 135-140.
- Winn, R.C. and C.B. Winn. (1985). Optimal control of auxiliary heating of passive-solar-heated buildings. *Solar Energy*, 35, 5, 419-427.
- Woodbury, R.F. (1991). Searching for design : paradigm and practice. *Building and Environment*, 26, 1, 61-73.
- Wouters, P., L'Heureux, D. et P. Voordecker. (1988). Mesures de l'étanchéité à l'air du bâtiment "auditoire" de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Rapport CSTC.
- Wouters, P., Vandaele, L., Voit, P. and N. Fish. (1993). The use of outdoor test cells for thermal and solar building research within the PASSYS project. *Building and Environment*, 28, 2, 107-113.
- Wray, W.D. and J.D. Balcomb. (1979). Sensitivity of direct space heating performance to fundamental parameter variations. *Solar Energy*, 23, 421-425.
- Wright, A.J., Lockley, S.R. and T.J. Wiltshire. (1992). Sharing data between application programs in building design : product models and object-oriented programming. *Building and Environment*, 27, 2, 163-171.
- York, D.A. and E.F. Tucker. (1981). DOE 2.1 Reference manual. National technical information service, Washington D.C.
- Zaheer-Udin, M. (1992). Optimal control of a single zone environmental space. *Building and Environment*, 27, 1, 93-103.
- Zamanian, M.K., Fenves, S.J. and E.L. Gursoz. (1992). Representing spatial abstractions of constructed facilities. *Building and Environment*, 27, 2, 221-230.
- Zeigler, B.P. (1976). The aggregation problem. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, IV, 299-311, Academic Press.

Zhao, H. and J.C. Visier. (1991). Intermittent heating system control based on the quadratic optimization principle. *Proceedings Building Simulation 91*, 187-193.

Zozaya-Gorostiza, C., Hendrickson, C. and D.R. Rehak. (1990). A knowledge-intensive planner for construction projects. *Building and Environment*, 25, 3, 269-278.

RESUME

Dans le cadre général d'un problème environnemental, la prise de décision constitue un processus pluridisciplinaire intégrant différents acteurs et différents critères.

L'objet essentiel de cette thèse est de montrer que les outils informatiques utilisés en support à la décision doivent revêtir le même caractère intégrateur. Pour ce faire, la thèse propose une méthodologie d'association des ressources informatiques au sein d'un logiciel intégré et son application à différents problèmes d'environnement.

La première partie du travail analyse individuellement les ressources informatiques constitutives du système intégré : les logiciels de simulation en ce compris les mesures validantes sous-jacentes et les modèles mathématiques utilisés, notions harmonisées par l'intermédiaire de la théorie des systèmes, les systèmes de base de données ; les systèmes experts; les logiciels graphiques.

La seconde partie réalise l'intégration des différents composants en faisant appel à une technologie informatique moderne basée sur la programmation orientée objet. Elle débouche sur la proposition du prototype "IDEFIX", acronyme de ' Intelligent Decision-making in Environment Featuring the Integration of CROSS resources'.

Tout au long de la thèse, les différentes étapes du travail se voient illustrées concrètement sur des problèmes liés à la conception environnementale (ie tirant un profit maximal des ressources naturelles) des bâtiments. Cependant, chaque chapitre se termine par les éléments nécessaires à la généralisation de la démarche à d'autres problèmes environnementaux.

Enfin, le travail se termine par la présentation de l'application de l'approche à deux problèmes spécifiques : l'analyse de la dispersion des polluants et la gestion d'une station d'épuration.