



**HAL**  
open science

# Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications

Harry Boyer

► **To cite this version:**

Harry Boyer. Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications. Autre. Université de la Réunion, 1999. tel-00762910

**HAL Id: tel-00762910**

**<https://theses.hal.science/tel-00762910>**

Submitted on 9 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre

Année 1999

# Mémoire

*présenté*

DEVANT L'UNIVERSITE DE LA REUNION

*pour obtenir*

Le grade de

Docteur HABILITE A DIRIGER LES RECHERCHES

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE LA CONCEPTION

présenté par Harry BOYER

Ingénieur de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM)  
Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon)

Maître de conférences à l'Université de La Réunion  
Département de Physique - Mécanique  
Laboratoire de Génie Industriel



## **Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications**

A soutenir le 6 *Décembre* 1999 devant la commission d'examen

Jury	J. BRAU	Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
	G. ACHARD	Professeur, Université de Savoie
	A. DELSANTE	Dr., CSIRO, Adelaïde (Australie)
	J. C. GATINA	Professeur, Université de la Réunion
	P. HERVE	Professeur, Université de la Réunion
	O. SERO-GUILLAUME	Directeur de Recherches CNRS, LEMTA, INPL Nancy

---

## *Sommaire*

Avant propos

Résumé

Introduction

### Chapitre 1 : Introduction à notre activité de recherche

<b>1 LE CONTEXTE DE NOTRE ACTIVITE</b>	12
1.1 CURRICULUM VITAE	12
1.2 ACTIVITE PROFESSIONNELLE ANTERIEURE AU DOCTORAT :	14
1.3 LE CONTEXTE DU LABORATOIRE DE GENIE INDUSTRIEL	15
<b>2 CONTRIBUTION EN MODELISATION :</b>	22
2.1 EN THERMIQUE DES BATIMENTS	22
2.2 CONTRIBUTION EN MODELISATION DANS DES DOMAINES CONNEXES	37
2.3 PERSPECTIVES LIEES A LA MODELISATION HYBRIDE	39
<b>3 CONTRIBUTION A LA VALIDATION :</b>	42
3.1 LES SUPPORTS DE MESURE	42
3.2 LA METHODOLOGIE	50
3.3 CONFRONTATIONS EXTERIEURES	53
<b>4 UNE APPLICATION A GRANDE ECHELLE : LE LABEL ECODOM</b>	61

### Chapitre 2 :Analyse de sensibilité et d'incertitude en thermique du bâtiment

<b>1. INTRODUCTION :</b>	66
<b>2. REVUE DES METHODES EN THERMIQUE DES BATIMENTS</b>	68
2.1. METHODES PROBABILISTES D'ANALYSE D'INCERTITUDE	68
2.2. METHODES DETERMINISTES D'ANALYSE DE SENSIBILITE	69
<b>3. INTEGRATION DANS L'ENVIRONNEMENT CODYRUN :</b>	72
3.1. ANALYSE D'INCERTITUDE :	72
3.2. ANALYSE DE SENSIBILITE	76
<b>4. UNE CONTRIBUTION METHODOLOGIQUE A L'ANALYSE DE SENSIBILITE :</b>	76
4.1. LA METHODE PROPOSEE :	77
4.2. LE LIEN AVEC L'ANALYSE DE REGRESSION	78
4.3. UNE APPLICATION AVEC LA CELLULE EXPERIMENTALE	81
<b>5. VARIATIONS AUTOUR DE LA CELLULE LGI :</b>	84
5.1. SCREENING ET ANALYSE D'INCERTITUDE MCA:	84
5.2. SCREENING, DSA ET ANALYSE D'INCERTITUDE MCA :	86
<b>6. QUELQUES PERSPECTIVES EN LIAISON AVEC NOS AUTRES TRAVAUX :</b>	86

---

---

---

---

## Chapitre 3 : Automatique des systèmes d'état et thermique des bâtiments

<b>1. L'APPLICATION DE L'AUTOMATIQUE LINEAIRE MONOVARIABLE:</b>	<b>92</b>
<b>2. LE FORMALISME D'ETAT :</b>	<b>92</b>
<b>3. RAPPELS SUR LA METHODE MODALE :</b>	<b>95</b>
3.1. ANALYSE MODALE	95
3.2. REDUCTION MODALE :	97
3.3. SYNTHESE MODALE :	97
<b>4. LIMITATIONS ET AMENAGEMENTS POUR CODYRUN :</b>	<b>98</b>
4.1. THERMO-AERAULIQUE ET STATIONNARITE.	98
4.2. LE CHOIX DES VARIABLES DE SOLLICITATIONS RADIATIVES EXTERIEURES	99
4.3. NECESSITE DE L'ECRITURE DE BILANS DE FLUX :	99
4.4. LE TRAITEMENT DES ECHANGES RADIATIFS INTERIEURS :	100
4.5. PRISE EN COMPTE DE L'INERTIE DES VITRAGES	100
<b>5. APPLICATION DE LA REDUCTION MODALE :</b>	<b>100</b>
<b>6. PERSPECTIVES DE RECHERCHE A COURT ET PLUS LONG TERME :</b>	<b>104</b>
6.1. ANALYSE DE SENSIBILITE ET SYSTEME D'ETAT :	104
6.2. APPLICATION DE LA THEORIE DES OBSERVATEURS A LA MESURE :	107
6.3. APPLICATION DE LA REDUCTION EN REGULATION :	111

### Conclusion

### Bibliographie

### Annexes

- A : Liste exhaustive des publications
  - B : Encadrement doctoral et participation à des jurys
  - C : Enseignement et activité pédagogique
  - D : Responsabilité de contrats de recherche
  - E : Principales publications (document séparé)
- 
-

## **AVANT - PROPOS**

Ce document décrit mes activités scientifiques menées au sein du Laboratoire de Génie Industriel (L.G.I., JE 405), en tant que responsable de l'équipe Génie civil, ainsi que celles liées à ma fonction de Maître de Conférences au Département de Physique Mécanique de l'Université de La Réunion.

Notre activité de recherche a pour cadre celui de la Thermique du bâtiment et pour ma part plus spécifiquement celle de la modélisation du comportement thermo-aérodynamique d'enveloppes et de systèmes associés.

La partie centrale de ce mémoire est celle présentant nos activités de recherche, mettant en avant notre contribution tant en matière de modélisation de systèmes complexes, de la validation de tels modèles ou encore d'application à grande échelle de nos travaux. Une présentation des recherches en cours au sein de l'équipe est effectuée et ainsi que des perspectives que nous traçons pour les années futures.

Enfin, je décris également dans ce document mes activités d'enseignement et administratives, ainsi que divers aspects synthétisant l'activité des années précédentes (principales publications, liste exhaustive des travaux publiés, ... ).

## *Remerciements*

S'il est difficile pour un doctorat, l'exercice des remerciements l'est encore bien plus pour une Habilitation à Diriger les Recherches. Avant tout, un regard sur les années passées (3 en thèse, 6 en poste) évoque personnellement une aventure humaine avant même d'être scientifique. Mes premières pensées sont ainsi pour les membres de mon équipe de recherche qui, à un moment où un autre, ont tous apporté une pierre déterminante au travail accompli. Mes plus anciens compagnons, ayant emprunté à mes côtés des chemins parfois tortueux, se prénomment ainsi François GARDE, Philippe LAURET et Laetitia ADELARD, tous trois Maîtres de conférences.

La trajectoire collective de l'équipe ou individuelle de chacun de ses membres a été marquée par le Professeur Jean-Claude GATINA de l'Université de la Réunion, fondateur du Laboratoire de Génie Industriel, puis membre de l'équipe Génie Civil. Merci Jean-Claude pour ta confiance et ton soutien.

En filigrane, le Professeur Jean BRAU de l'INSA de Lyon (CETHIL, URA 1372) reconnaîtra lui aussi dans ce manuscrit certains aspects dont nous avons discuté du temps de mon doctorat ... en tant que pistes de recherche futures. Clairvoyance et conseils avisés constituent les maître mots de sa contribution.

A Patrick HERVE, Président honoraire et Professeur à l'Université de La Réunion, directeur du Laboratoire de Génie Industriel, j'exprime ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée. J'aime à me souvenir qu'il s'agit du premier enseignant chercheur physicien du supérieur dont j'ai suivi les cours et je suis honoré de sa participation à mon jury d'habilitation.

Olivier SERO-GUILLAUME, Directeur de Recherches au CNRS, LEMTA (UMR 7563) m'a fait l'honneur de rapporter ce manuscrit. A l'occasion de ses précédentes visites à l'occasion de jury de thèse et de DEA, nous avons eu beaucoup de discussions intéressantes. Nous en avons eu d'autres après la soutenance et j'espère qu'elles seront tout aussi porteuses.

Gilbert ACHARD, Professeur à l'Université de Savoie, dont la simplicité n'a d'égal que sa compétence, a accepté de faire partie du jury. Qu'il en soit remercié.

Angelo DELSANTE, Head Researcher au CSIRO d'Australie, possède une expérience très similaire à la mienne en thermique du bâtiment. Merci, malgré l'obstacle de la langue, d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir minutieusement amendé les versions anglaise puis française du manuscrit.

Bien que ce soit inhabituel, il m'est agréable de citer un doctorant de l'équipe, Thierry MARA. Sa persévérance et sa rigueur nous ont souvent aidé à franchir des obstacles, tant du point de vue de la modélisation, de l'expérimentation ou de nos contrats industriels.

Enfin, Anita et Pierre, ma compagne et mon fils, sont ceux à qui je dois le plus. Merci surtout pour votre patience.

## Résumé

La première partie présente le contexte de l'activité recherche dont le thème principal est celui de la thermique et de l'énergétique des bâtiments. En tant que responsable de l'Equipe génie civil au sein du Laboratoire de Génie Industriel, j'évoque la structuration progressive d'un environnement recherche vis à vis de différents aspects. La contribution spécifique en modélisation thermo-aéraulique et multi-modèle du bâtiment est ensuite abordée (code de calcul *CODYRUN*), en insistant sur les prolongements donnés à ce travail, tant en matière de modélisation, de validation (méthodologie, expérimentation) et d'application à grande échelle de nos travaux dans le cadre d'un label applicable aux Départements d'Outremer Français.

A court et moyen terme, l'analyse de sensibilité et d'incertitude appliquées à notre domaine constituent une première perspective intéressante et forment ainsi le deuxième chapitre. Une revue des méthodes et de leur application dans notre domaine a débouché d'une part sur l'intégration à notre code de calcul de l'analyse d'incertitude statistique, à des fins de validation. D'autre part, une contribution méthodologique originale est présentée pour l'analyse paramétrique, basée sur la propagation de signaux déterministes dans un modèle (de bâtiment, par ex.) pour en déterminer les coefficients de sensibilité. Des confrontations probantes des résultats de cette méthode avec celle statistique sont alors présentées.

Enfin, les applications du formalisme de l'Automatique des systèmes d'état forment la dernière partie. Après une présentation des outils mathématiques et des applications classiques (analyse et réduction modale), un développement spécifique a été conduit autour d'un de nos supports expérimentaux, avec pour objectif atteint de cerner les modifications à apporter à *CODYRUN* en vue de l'intégration d'algorithmes de réduction, dans une optique d'analyse et de diminution du temps calcul. Au rang des perspectives long terme, la théorie des observateurs appliquée à la mesure ainsi que l'utilisation des modèles réduits en vue de la commande de systèmes de traitement d'air clôturent ce chapitre.





## *Introduction*

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique est devenu en quelques années un outil très utilisé. Ainsi, des modèles de simulation ont été développés durant les années 1980 essentiellement dans l'hémisphère nord, pour répondre à des besoins de dimensionnement de l'enveloppe en terme d'isolation et pour estimer le coût d'exploitation des systèmes de conditionnement de l'air.

L'étude du comportement thermique d'une cellule d'habitation fait appel au traitement des transferts couplés de masse et de chaleur, par conduction au travers des parois, rayonnement et convection aux surfaces. Un calcul rigoureux fait ainsi appel à des modèles mathématiques complets et par là même complexes dans leur mise en œuvre. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs se sont orientés vers une simplification des outils tout en conservant un degré de précision suffisant. Cependant, avec les progrès réalisés par la puissance des stations de travail courantes, la simulation thermique des bâtiments s'attaque depuis quelques temps à la résolution de problèmes complexes : bâtiments présentant un grand nombre de zones, prise en compte des phénomènes aérauliques, dispersion des polluants, migration de l'humidité au sein des parois, couplage avec des systèmes de traitement d'air, ...

Compte tenu des objectifs visés, des progrès réalisés en matière de modélisation, il est à noter que les outils disponibles balaient un large spectre, depuis l'outil très simplifié à l'usage de concepteurs (monozone, sans aéraulique, ...) à celui très détaillé à l'usage exclusif du physicien du bâtiment. De par la disparité des objectifs, la grande variété des cas rencontrés (par ex. de 1 à 100 zones), l'adéquation entre le modèle, le bâtiment, les objectifs et les contraintes de temps calcul ne sont pas faciles à concilier. Dans la dernière décennie, plus de 100 programmes de simulation ont ainsi été développés. Une grande majorité des codes s'attache au problème thermique, une autre au problème aéraulique et un nombre plus réduit traite du problème couplé. Notre contribution en terme d'outil est celle d'un code détaillé, qui de par son aspect multimodèle apporte des éléments de réponse au compromis évoqué précédemment.

A côté de cette problématique basée sur la modélisation, se pose cependant le problème du crédit à apporter aux résultats de simulations de ces codes, autrement dit de l'aptitude de ces logiciels et des modèles intégrés à représenter la réalité. Il s'agit là du

problème de la validation des codes de calcul en thermique du bâtiment. La mise en évidence de ce problème trouve son origine dans l'étude menée par le Solar Energy Research Institute (SERI) en 1981 montrant des écarts importants entre les résultats de divers logiciels entre eux mais aussi par rapport aux résultats de mesures.

De même que beaucoup d'autres équipes de recherche, nous nous sommes attachés à cet aspect, avec la conception de supports expérimentaux spécifiques ou la validation in situ de notre code de calcul. Cependant, un effort méthodologique important a été effectué, avec tout d'abord l'utilisation des techniques de traitement du signal (analyse spectrale et temps fréquence). Par la suite, une application originale est proposée pour l'analyse de sensibilité ainsi que pour la mesure par méthode inverse en thermique du bâtiment.

Pour ce mémoire, le choix a été fait de reporter en annexe les articles de revues publiés traitant de la partie modélisation spécifique et des applications du code *CODYRUN*. De même, chaque fois que cela a été possible, référence est faite aux thèses soutenues au sein de l'équipe plutôt que d'en importer des parties entières. Le corps du texte est constitué de trois chapitres, le premier correspondant à des travaux antérieurs ou en cours, replacés dans leur contexte de l'équipe génie civil dont je suis responsable. Les deux suivants présentent des pistes de recherche initiées actuellement ou à développer pour les années à venir.

Le chapitre premier traite principalement de la modélisation et de la validation en thermique de l'habitat. Les publications annexées font partie intégrante du premier thème de cette partie. Notre environnement de modélisation, les supports expérimentaux et la méthodologie de validation y sont présentés. Le cas de la modélisation hybride est abordé en tant que perspective à court terme.

L'analyse de sensibilité et d'incertitude en thermique des bâtiments forme le chapitre suivant, ces travaux étant considérés comme parties intégrantes de la démarche de validation. Fortement associée à la notion de qualité de modèle, cette partie ajoute aux fonctionnalités de *CODYRUN* celle d'un outil d'assistance à la validation expérimentale.

La dernière partie du mémoire constitue un nouvel axe pour l'équipe, centré sur l'utilisation de l'automatique des systèmes d'état en thermique des bâtiments. Les applications envisagées dans le domaine de l'analyse modale, de la réduction de modèles (et donc du temps calcul) et d'instrumentation (capteur logiciel ou observateur) sont alors présentées.

# *Introduction à l'activité de recherche de l'équipe Génie civil*

Cette première partie fait le point de l'activité menée principalement entre 1992 et 1999, vis à vis des aspects de structuration d'un environnement de recherche, puis de modélisation, de validation et d'application de nos travaux. En thermique du bâtiment, le code de calcul, ainsi que les principaux développements associés sont présentés, de même que sont évoquées nos contributions en thermique urbaine et en génération de séquences climatiques à des fins de simulation. Pour la validation, la méthodologie, les supports spécifiquement conçus, les expérimentations menées en site réel ainsi que quelques résultats de validation sont présentés. Dans un contexte international, des comparaisons inter-modèles et inter-supports ont été entreprises, dont les premiers résultats sont intégrés à cette partie. Enfin, notre implication dans le tissu industriel nous a amené à avoir une activité applicative importante. Le label *ECODOM* ainsi que les suites qui y sont données clôturent ce chapitre.

<b>1</b>	<b>LE CONTEXTE DE NOTRE ACTIVITE</b> .....	<b>12</b>
1.1	CURRICULUM VITAE .....	12
1.2	ACTIVITE PROFESSIONNELLE ANTERIEURE AU DOCTORAT : .....	14
1.3	LE CONTEXTE DU LABORATOIRE DE GENIE INDUSTRIEL .....	15
1.3.1	<i>Fiche signalétique de l'équipe</i> .....	15
1.3.2	<i>Les ressources humaines</i> :.....	17
1.3.3	<i>La politique de recherche et les résultats obtenus</i> : .....	18
1.3.4	<i>Les résultats de l'équipe en terme de contrats de recherche</i> :.....	20
<b>2</b>	<b>CONTRIBUTION EN MODELISATION</b> :.....	<b>22</b>
2.1	EN THERMIQUE DES BATIMENTS .....	22
2.1.1	<i>Notre approche de la modélisation thermique des bâtiments</i> : .....	23
2.1.1.1	Quelques repères en modélisation thermique des bâtiments.....	23
2.1.1.2	Comment et pourquoi un développement spécifique .....	24
2.1.2	<i>Les principaux apports post thèse en modélisation</i> .....	27
2.1.2.1	Vis à vis de l'aspect recherche .....	27
2.1.2.1.1	Intégration des STA du type split-system.....	27
2.1.2.1.2	Modèles de température du ciel.....	31
2.1.2.1.3	Prise en compte des échanges convectifs extérieurs .....	32
2.1.2.1.4	Charges internes à évolution spécifique .....	32
2.1.2.1.5	La refonte de l'application .....	33
2.1.2.2	Vis à vis de l'aide à la conception .....	34
2.1.2.2.1	Masques.....	34
2.1.2.2.2	Parois sur vide sanitaire .....	35
2.1.2.2.3	Doubles vitrages.....	36
2.1.2.2.4	Divers.....	36
2.1.2.3	Nos autres environnements de modélisation .....	36
2.2	CONTRIBUTION EN MODELISATION DANS DES DOMAINES CONNEXES .....	37
2.2.1	<i>Thermique urbaine</i> .....	37
2.2.2	<i>Génération de séquences climatiques</i> .....	38
2.2.3	<i>Modélisation en Génie des procédés</i> :.....	39
2.3	PERSPECTIVES LIEES A LA MODELISATION HYBRIDE .....	39
<b>3</b>	<b>CONTRIBUTION A LA VALIDATION</b> :.....	<b>42</b>
3.1	LES SUPPORTS DE MESURE .....	42
3.1.1	<i>La cellule LGL</i> .....	43
3.1.2	<i>Les supports en environnement naturel</i> .....	45
3.1.3	<i>Les perspectives liées au nouveaux supports</i> .....	47
3.1.3.1	Les cellules ISOTEST .....	47
3.1.3.2	STA-TRON.....	48
3.1.4	<i>Les capteurs et l'instrumentation associée</i> .....	49
3.2	LA METHODOLOGIE .....	50
3.2.1	<i>Analyse spectrale du résidu</i> .....	51
3.2.2	<i>Les apports de l'analyse temps fréquence</i> .....	52
3.3	CONFRONTATIONS EXTERIEURES .....	53
3.3.1	<i>La procédure BESTEST</i> : .....	54
3.3.2	<i>Confrontations avec EDF-DER / Cellules ETNA</i> .....	56
3.3.2.1	Analyse visuelle .....	57
3.3.2.2	Analyse mathématique :.....	58
<b>4</b>	<b>UNE APPLICATION A GRANDE ECHELLE : LE LABEL ECODOM</b> .....	<b>61</b>

## **1 LE CONTEXTE DE NOTRE ACTIVITE**

A l’instar de beaucoup d’universités, celle de La Réunion se distingue par un fort taux de croissance des effectifs, lié à l’arrivée en masse de jeunes des générations de l’après départementalisation (1946). Les priorités de l’établissement (université autonome depuis 1982) ont été alors, à juste titre, celles de la construction de l’Université de La Réunion plus en terme de construction de locaux et de développement de filières que de structuration de la recherche.

En parallèle, l’environnement industriel de la Réunion a été et est peu développé, excepté dans une certaine mesure en milieu sucrier. C’est en effet un domaine dans lequel la technologie développée et mise en œuvre localement a été, à une certaine époque, reconnue mondialement, avec des ouvrages de référence tels que ceux de Hugot [Hugot 87]. En terme de recherche et de partenariat avec le milieu local, le mitage du tissu industriel nécessite l’identification de niches thématiques dans lesquelles la taille réduite de nos équipes de recherche ne constitue pas un handicap insurmontable. Dans notre domaine de la thermique des bâtiments, les priorités de l’après départementalisation en matière de logements ont été (et sont encore) le plus souvent quantitatives, à vrai dire indépendamment des aspects liés au confort thermique et aux économies d’énergie. L’importation de modèles de construction métropolitains s’est fait au détriment d’une conception vernaculaire dont les principes renaissent de nos jours, en partie avec nos travaux. Depuis quelques années, des préoccupations importantes en maîtrise de l’énergie sont apparues, permettant une collaboration avec divers institutionnels (EDF, ADEME, Ministère) autour de cette problématique.

A titre plus personnel, le curriculum vitae ainsi que la partie traitant de l’activité professionnelle pré-thèse, apportent un certain éclairage sur mon parcours et les suites qui y ont été données.

### **1.1 Curriculum Vitae**

## CURRICULUM VITAE

NOM : BOYER  
Prénom : Harry  
Date de lieu de naissance : 17/09/65 à Dieppe (76)  
Nationalité : Française  
Situation de famille : Vie maritale, 1 enfant  
Adresse personnelle : 2 avenue Raymond Barre  
97 427 Etang Salé les Hauts  
N° de tél : 02 62 29 92 79 – 02 62 93 82 12  
E. mail : [harry.boyer@univ-reunion.fr](mailto:harry.boyer@univ-reunion.fr)

### **Fonctions extra universitaires :**

- 01/09/87- 31/12/88 : Volontaire à l'Aide Technique, Analyste Informaticien  
Direction de l'Agriculture et de la Forêt de la Réunion
- 01/01/89- 31/08/90 : Ingénieur développement en Informatique Industrielle  
Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre  
(C.T.I.C.S.), Réunion
- 01/09/90 – 30/11/90 : Ingénieur Responsable bureautique  
Banque de la Réunion (Crédit Lyonnais)

### **Fonctions universitaires :** (Département de Physique-Mécanique, Université de la Réunion)

- 01/12/90 au 31/08/91 : Doctorant, vacataire d'enseignement
- 01/09/91 au 31/08/93 : Doctorant moniteur
- 01/09/93 au 31/08/94 : ATER
- 01/09/94 au 01/09/97 : Maître de conférences 2<sup>ième</sup> classe
- depuis 01/09/97 : Maître de conférences 1<sup>ère</sup> classe (contingent CNU)
- depuis 01/09/98 : Contrat d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR)

### **Titres universitaires :**

- Ingénieur, option Microélectronique et Automatique et DEA d'Electronique  
Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (*I.S.I.M.*), 1987
- Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées de Gestion, 1990  
Institut d'Administration des Entreprises (*I.A.E.*) de Lyon III (en formation continue)
- Doctorat de Génie Civil - mention Génie civil et sciences de la conception  
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon  
Intitulé : Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un  
outil à choix multiple des modèles", 13 Décembre 1993  
Directeur de Thèse : Pr. Jean BRAU, Co-directeur : Pr Jean Claude GATINA  
Prix développement local de la Caisse des Dépôts et Consignations

### **Divers :**

- Lauréat du CAPET Génie Electrique (1991), option *Electronique Automatique*
- Pilote privé avion

## 1.2 Activité professionnelle antérieure au doctorat :

Le curriculum vitae précédent fait état des différentes fonctions que j'ai occupées entre la fin de mes études initiales (Ingénieur en Microélectronique et Automatique, 1987) et fin 1990 pour le début du doctorat. Il m'apparaît important de détailler sensiblement mes activités dans ce cadre professionnel dans la mesure où les compétences et expériences acquises ont fortement influé sur mes activités de recherche du doctorat et post doctorat ainsi que celles d'enseignement.

Dans l'axe de ma formation initiale, j'ai choisi d'effectuer les deux stages d'études intégrés à la formation dans le domaine de l'instrumentation. Tant au sein du groupe LAFARGE qu'à IBM, les sujets qui m'ont été confiés avaient trait à l'automatisation de mesures, avec développement de cartes et de logiciels associés. Ultérieurement, le marché de l'emploi local m'a conduit à orienter ma carrière du côté du développement technique et industriel. C'est ainsi que le service effectué en tant que Volontaire à l'Aide Technique informaticien m'a permis d'acquérir une méthodologie de développement informatique (MERISE, SADT, ...) dont j'ai tiré parti dans le cadre du doctorat, bien qu'acquise dans un environnement très différent (Mini-système BULL Mini 6, Cobol GCOS 6, chaînes de paiement de subventions agricoles, ...). J'ai ensuite occupé les fonctions de chef de projet au CTICS (Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre), dans le cadre de l'automatisation complète d'une chaîne d'analyse de la richesse de la canne. Autour d'un logiciel de gestion d'atelier, il s'agissait d'une part d'automatiser des opérations initialement manuelles (pressage des échantillons, convoyage de jus, filtrage, ...) et de séquencer différentes phases (échantillonnage, pesées, mesures polarimétriques et saccharimétriques, dosages, ...) dans le but de déterminer in fine la richesse du chargement livré. Ce projet, financé par l'ANVAR à hauteur de 700 kF, faisait appel à diverses disciplines (Automatique séquentielle, conception de machines spéciales, robotique, électricité courants forts, instrumentation électronique) et matériels spécifiques (Automate programmable, bras manipulateur, carte temps réel et interfaces, ...) et m'a en particulier permis d'acquérir des compétences spécifiques (langage C en particulier) et plus générales (ordonnancement, gestion de projets, ...).

Dans le cadre de mon doctorat au cours duquel une grande autonomie m'a été accordée par mes encadrants, cette expérience pré-thèse m'a incité tout d'abord à orienter mon sujet de thèse de manière à valoriser des compétences acquises (développement

informatique en particulier, ayant conduit au développement d'un code détaillé de simulation thermique du bâtiment, *CODYRUN*). En enseignement, j'ai exercé préférentiellement dans des domaines proches de ma formation initiale ou de mon expérience. Plus récemment, l'expérience acquise en automatique sucrière m'a amené à collaborer à une thèse dans le domaine sucrier ayant trait à la modélisation et au contrôle du procédé de cristallisation, donnant lieu à deux articles publiés [Lauret 99a, Lauret 99b]. Ne se situant pas dans l'axe de nos travaux en thermique des bâtiments, cette partie n'est pas développée dans ce mémoire, sinon qu'au niveau des perspectives d'application dans notre domaine.

### **1.3 Le contexte du Laboratoire de Génie Industriel**

Dans le domaine de l'énergétique solaire et de la thermique de l'habitat, un certain nombre de travaux avaient été conduits à l'Université de la Réunion avant la création du Laboratoire de Génie Industriel (LGI), tels que [Gatina 79] et [Gatina 84]. A ce moment, les thématiques initiales (thermique des bâtiments et énergétique sucrière) impulsées par le directeur de l'époque (J.C. Gatina) ont été initialement motivées par le souhait d'une bonne articulation de nos travaux avec le milieu industriel et les préoccupations locales. Dans l'axe Génie civil thermique du bâtiment, les travaux que j'ai entrepris lors de mon doctorat ont permis d'intégrer ou de prolonger au sein d'un outil de modélisation des compétences acquises lors de précédentes thèses (gisement solaire [Mézino 85], expérimentations sur d'une toiture dalle [Baronnet 87] et des toitures complexes [Tourrand 91] [Tourrand 94], répartition spectrale du rayonnement au sol à la Réunion [Vaxelaire 89]). Par la suite, au sein du LGI (dont la date de création ne précède que de peu mon inscription en thèse), je suis, depuis mon recrutement (1994), responsable de l'équipe Génie Civil, comprenant alors un autre Maître de Conférences, 1 ATER et 3 doctorants. Cette responsabilité est celle de la structuration d'un environnement de recherche, allant de la définition de la thématique, de la participation aux recrutements, de la définition des supports expérimentaux, à la recherche de financements industriels ou de bourses ou encore la planification des investissements. D'autres aspects sont aussi ceux de la gestion au quotidien de l'équipe (gestion des comptes et conventions, ...), de la politique d'abonnements aux revues, de l'acquisition d'ouvrages de référence, ...

La fiche signalétique suivante fait état de la composition de l'équipe, fin 1999

#### **1.3.1 Fiche signalétique de l'équipe**



## LABORATOIRE DE GENIE INDUSTRIEL



### EQUIPE GENIE CIVIL

<i>Formations doctorales</i>	:	Méthodes de conception en bâtiment et techniques urbaines, Energétique
<i>Responsable</i>	:	Harry BOYER Maître de conférences 60 <sup>ième</sup> section
<i>Membres</i>	:	Patrick HERVE Directeur du laboratoire, Professeur 60 <sup>ième</sup> section
		Laëtitia ADELARD Maître de conférences 60 <sup>ième</sup> section (*)
		Jean Claude GATINA Professeur 60 <sup>ième</sup> section
		François GARDE Maître de conférences 60 <sup>ième</sup> section
		Alfred Philippe LAURET Maître de conférences 60 <sup>ième</sup> section (*)
		Anis YOUNES Maître de conférences 60 <sup>ième</sup> section (*)
		Eric FOCK Doctorant CIFRE (EDF)
		Franck LUCAS PRAG Génie Civil, doctorant
		Thierry MARA Doctorant Région Réunion
		Frédéric MIRANVILLE Doctorant MRES

(\*) à compter de Sept. 1999

*Mots clés* : Transferts de chaleur couplés, habitat, modélisation, énergétique, conception, validation.

#### Thématique de recherche

Notre domaine initial de recherche est celui de la modélisation et simulation thermo-aéraulique des bâtiments et de systèmes associés. Les principales directions prises ont été celles du développement d'un code appartenant à la classe des outils détaillés, à usage de recherche et d'aide à la conception (*CODYRUN*). Ses principales caractéristiques en sont le multizonage, le couplage des phénomènes thermiques et aérauliques ainsi que l'aspect multi-modèle. Par ailleurs, nous utilisons aussi des environnements de modélisation à usage général tels que *TRNSYS*.

Nous nous sommes ensuite attachés à la validation expérimentale de modèles en climatisation passive et active, tant en laboratoire qu'en environnement extérieur. Notre contribution spécifique est celle de la mise en place de supports dédiés et porte aussi sur l'aspect de la méthodologie. A l'aide de techniques de traitement de signal, autour de supports expérimentaux spécifiquement conçus et de logements réels, des avancées significatives ont pu être effectuées. Les analyses de sensibilité et d'incertitude font depuis peu partie de nos préoccupations.

Les aspects de thermique urbaine et par la suite de génération de données climatiques cohérentes à des fins de simulation ont aussi été développées dans cette équipe.

Au travers de contrats industriels, des applications à grande échelle de nos travaux ont vu le jour, sous la forme d'un label de construction applicable à l'ensemble des DOM, label qui préfigure une réglementation pour les années à

venir. Depuis sa création, environ 500 logements ont été construits en regard des prescriptions édictées à la suite d'un contrat de simulations sur des logements type, en partenariat avec EDF-DOM. En prolongement, des campagnes de validation expérimentale des prescriptions d'une part et de nos modèles se déroulent sous la forme de contrats institutionnels.

#### Evaluation scientifique

Sur les 4 dernières années (1996-1999),

- 11 publications dans des revues
- 19 communications à des congrès avec actes
- 3 thèses soutenues
- 1 MF de contrats extérieurs

#### Perspectives

De par notre approche pluridisciplinaire et une meilleure prise de conscience collective des problèmes liés à l'énergie et l'environnement, les perspectives sont étendues. Les thèmes à court et moyen terme ont trait à la poursuite de la modélisation détaillée en thermique des bâtiments et des systèmes associés ainsi qu'à la validation de tels modèles. En terme de disciplines, les compétences spécifiques que nous développons actuellement sont celles de l'automatique, la mécanique des fluides appliquée aux écoulements dans l'habitat et de l'instrumentation spécifique.

Cet objectif de structuration d'un environnement de recherche étant fixé, différentes stratégies étaient envisageables. La mienne a été celle de la poursuite de l'activité de modélisation autour du code *CODYRUN*, définissant ainsi une *stratégie outil*. C'est ainsi que les travaux qui ont été enclenchés à la suite de mon doctorat se sont articulés et appuyés sur ce premier doctorat (cf paragraphe concernant la politique de recherche et les résultats associés).

### 1.3.2 Les ressources humaines :

A la suite de mon doctorat, l'équipe s'est étoffée par un recrutement régulier de doctorants (1/an depuis 1992) et de statutaires, Maîtres de conférences (1 en 1997, 1 en 1998, 3 en 1999) et PRAG (1 en 1998). En concertation avec le directeur du laboratoire, la responsabilité d'équipe est aussi celle de la planification de la recherche, incluant celle des recrutements et des inscriptions d'étudiants en doctorat. Le tableau suivant explicite l'enchaînement des thèses au sein de l'équipe

	91	92	93	94	95	96	97	98	99	Commentaire
<i>H. Boyer</i>										<i>R94</i>
<i>F. Pignolet (1)</i>										<i>R97, D98</i>
<i>F. Garde (2)</i>										<i>R98</i>
<i>L. Adelaar (3)</i>										<i>R99</i>
<i>F. Lucas (4)</i>										<i>R98 (Prag)</i>
<i>T. Mara (5)</i>										<i>(Région Réunion)</i>
<i>E. Fock (6)</i>										<i>(CIFRE EDF)</i>
<i>F. Miranville (7)</i>										<i>(MRES)</i>

Les numéros en face des noms font référence au titre des thèses dont la liste suit ci-dessous :

- (1) Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide : modélisation thermo aéraulique globale
- (2) Validation de modèles en thermique de l'habitat et intégration détaillée des systèmes de traitement d'air dans un code de calcul multizone et multimodèle
- (3) Caractérisation de données météorologiques : proposition d'un générateur de données climatiques et application à la thermique du bâtiment.
- (4) Contribution à l'expérimentation de systèmes de traitement d'air et modélisation et sous environnement TRNSYS.
- (5) Validation et analyse de sensibilité de codes de simulation thermo-aéraulique de l'habitat.
- (6) Modélisation hybride en thermique du bâtiment sous environnements TRNSYS et CODYRUN
- (7) Détermination des propriétés thermo-physiques de matériaux ou de complexes de matériaux de nouvelle génération en régime dynamique utilisés dans l'habitat en climat tropical humide.

Par ailleurs, la dernière colonne du tableau (commentaire) fait état des mouvements au sein de l'équipe, *R* pour Recrutement, *D* pour Départ. Pour les thèses en cours, le type de financement est indiqué. Nous avons aussi mené une politique d'accueil de stagiaires (DEA, Maîtrise, Ecole) très active (voir annexes C), les sujets étant en lien avec nos recherches en cours, des pistes nouvelles ou encore des contrats industriels. D'autres informations sont disponibles en annexe B, relative à l'encadrement doctoral.

### 1.3.3 La politique de recherche et les résultats obtenus :

Après un démarrage lent de notre productivité, une accélération notable est observée. En effet, la première phase de notre thématique, centrée sur la modélisation et ses applications, n'était pas publiable aisément (en particulier en l'absence de confrontation avec des résultats expérimentaux). Cette deuxième phase a été initiée en 1994 (construction de la cellule expérimentale *LGI*, début de thèse de *F. Garde*, acquisition de matériel de mesure, ...) de façon très complémentaire à la première, nous permettant d'afficher des premiers résultats intéressants (en terme de valorisation de nos travaux). Ainsi, *CODYRUN*, parvenu alors à une certaine maturité, a alors constitué pour les membres de l'équipe un socle sur lequel il a été possible de greffer des ajouts ou applications spécifiques, ces derniers aspects devenant alors plus facilement valorisables. Ainsi,

- *F. Pignolet* (étant alors en thèse en même temps que moi même) s'est fortement inspirée de la méthode nodale et de la génération du modèle thermique [Boyer 96], appliquées au problème de thermique urbaine [Pignolet 97];
- Avec *F. Garde*, l'intégration des systèmes de traitement d'air, les applications du code et sa validation ont constitué des pistes de publications intéressantes. [Garde 97b][Garde 98];
- Les séquences météorologiques pour *L. Adelard* ont alimenté le code de calcul en sollicitations [Adelard 98b], [Adelard 99];
- Des études spécifiques ont pu être menées pour sa validation [Mara 98] et l'intégration de l'analyse de sensibilité et d'incertitude automatique avec *T. Mara* [Mara 99];
- La comparaison avec un autre code de calcul (*TRNSYS*) avec *F. Lucas* [Lucas 98];
- *CODYRUN* est l'une des structures d'accueil de la modélisation neuronale pour la thèse de *E. Fock*;

Le tableau suivant, tiré du bilan scientifique 1998 de l'équipe [Boyer 98] mis à jour pour l'année en cours, synthétise les indicateurs de notre production scientifique :

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Thèses	1			1	1	1	1
D.E.A.				2	1	1	4
<b>Publications liste SCI</b>		<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Communications	4	4	6	0	11	4	3
Rapports organismes extérieurs	1			1	2	1	4

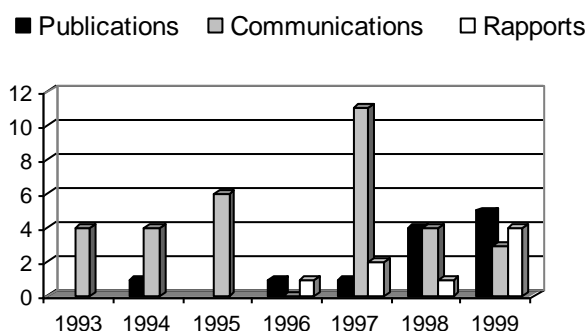


Figure 1 : Evolution de la productivité

De façon à nous rapprocher des standards de productivité, un effort important a été effectué en terme de nombre de publications ainsi qu'au niveau de la typologie de notre production. Cette politique d'ouverture de notre recherche commence à porter ces fruits au niveau international ou national :

- Proposition de co-tutelle de thèse avec l'Université de Genève, CUEPE, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie.

Utilisation des transferts thermiques avec le sous-sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, simulations numériques et modélisation analytiques de différents systèmes.

Mots clés : Instrumentation, TRNSYS, analyse de sensibilité, dimensionnement

Candidat Pierre Hollmuller, co – direction de thèse avec Pr. Bernard Lachal

- Participation au board of reviewers de revues de notre domaine
- Proposition de coopérations recherche (EDF/DER, Afrique du Sud, ...)
- Proposition de co-encadrement de thèse avec l'Université Antilles-Guyanne pour un étudiant ayant précédemment effectué son DEA au sein de notre équipe [Soubdhan 99].

Mots clés : Validation, expérimentation de toitures, ECODOM.

Pour l'avenir, compte tenu du nombre de supports<sup>1</sup> expérimentaux très riches non encore exploités (cellule, opérations expérimentales *La Trinité* et *La Découverte*), de ceux à venir (ISOTEST et STA-TRON) et des possibilités d'échanges avec des équipes extérieures, un gisement important existe, tirant parti de nos environnements de modélisation et des domaines nouveaux que nous abordons (analyse de sensibilité et d'incertitude, automatique appliquée au bâtiment, modélisation à base de réseaux de neurones, ...). Pour un horizon à moyen terme, un certain virage doit s'opérer, allant dans le sens

- d'actions de recherche sur les phénomènes de transports de la physique du bâtiment (transport d'humidité et de polluants par exemple)
- de possibilités d'échanges accrues au travers de l'environnement de modélisation TRNSYS (standard international) et permettant une meilleure gestion de nos développements intermittents (thèses, stagiaires, contrats ...)

#### 1.3.4 Les résultats de l'équipe en terme de contrats de recherche :

La politique forte d'investissement en matériel de recherche (acquisition de matériels et d'ordinateurs) et d'ouverture vers l'extérieur (participation à de nombreux congrès ou écoles d'été) que nous avons pratiquée a généré des besoins financiers importants qui ne pouvaient être couverts par les financements institutionnels du laboratoire (100 kF / an / équipe). Nous nous sommes en parallèle investis dans des contrats industriels s'accompagnant de rentrées financières tout d'abord modestes, puis plus conséquentes. Le tableau suivant donne l'évolution des financements extérieurs de l'équipe :

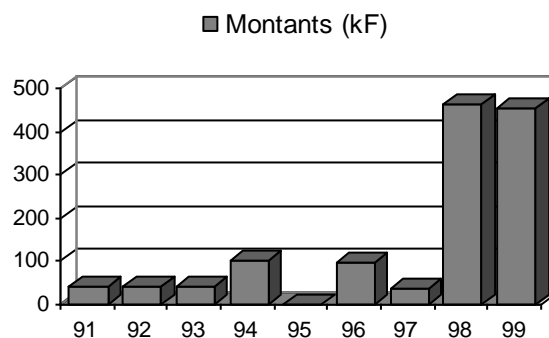


Figure 2: Evolution de l'autofinancement de l'équipe

<sup>1</sup> Ces supports seront présentés plus en avant dans ce chapitre

Depuis ma nomination, l'ensemble des contrats dont j'ai assuré la responsabilité scientifique (à titre personnel ou collectif au titre de la responsabilité d'équipe) au sein du laboratoire est d'un montant total d'environ 1 MF. Ces contrats (voir Annexe F pour la liste) ont porté en premier lieu sur des prestations de simulations numériques (à l'aide du code *CODYRUN*), de campagnes de mesures expérimentales (composants spécifiques du bâtiment, enveloppe, systèmes de climatisation) et enfin d'activité d'expertise, principalement pour le compte d'EDF dans le cadre du label ECODOM.

Pour les années à venir, d'autres contrats du même type sont en cours de finalisation (expertise pour des maîtres d'ouvrage, simulations avec *CODYRUN* pour un label *ECODOM à points* avec EDF- DOM, suivi expérimental et assistance expertise pour EDF-Réunion) et nous allons par ailleurs concourir sur les programmes Européens (Joule Thermie en particulier). Jusqu'à présent, bien que sollicités par des partenaires (laboratoires et B.E.), le faible nombre de statutaires de l'équipe ne nous le permettait pas. Les trois recrutements de MC de l'année 1999 nous permettront de passer à une autre étape.

## 2 CONTRIBUTION EN MODELISATION :

Au départ de la méthode systémique en thermique des bâtiments, nous avons abordé différents domaines dans lesquels différents types de modèles ont été développés, en vue d'applications en thermique du bâtiment, en thermique urbaine, en génération de séquences climatiques cohérentes ou encore de variables météorologiques.

### 2.1 En thermique des bâtiments

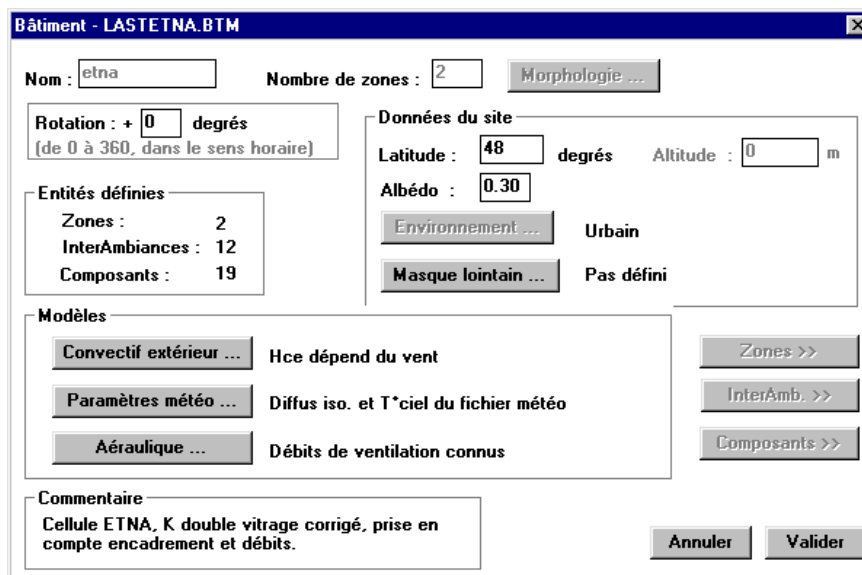


Figure 3 : Fenêtre description Bâtiment

Cette partie fait le point de la modélisation au sein de l'outil spécifique *CODYRUN* en mettant en avant les modifications et compléments apportés depuis la thèse de doctorat. La description des modèles, l'ensemble des équations, les méthodes de résolution sont disponibles dans le document [Boyer 93] ainsi que certains aspects spécifiques au sein de publications associées dont certaines sont annexées à ce manuscrit.

Les trois phases de développement au sein de l'outil sont de nature assez différentes :

- la première (1991-1993) avait pour objectif la soutenance de doctorat, mettant en avant des aspects spécifiques (multi-modèle avec aéraulique principalement).
- la seconde (1994-1998) était centrée d'une part sur une plus grande opérationnalité du code vis à vis des aspects d'aide à la conception (développements fortement motivés par des contrats industriels, ECODOM en particulier) et d'autre part d'apports liés à la validation et de modèles spécifiques par rapport à l'aspect recherche.

- La dernière phase est celle d'une refonte de l'application sous un nouvel environnement de développement visant à assurer le portage, la pérennité et l'évolution du travail effectué. A la différence des deux premières, cette phase fait l'objet d'un développement informatique partagé avec P. Lauret (MC recruté à la rentrée 1999).

## 2.1.1 Notre approche de la modélisation thermique des bâtiments :

### 2.1.1.1 Quelques repères en modélisation thermique des bâtiments

Initialement, le développement des codes de simulation est longtemps resté réservé aux équipes nombreuses, disposant d'ordinateurs puissants, de par une certaine complexité du couplage des modes de transfert, de la taille de systèmes mis en jeu ou encore du temps calcul. Ainsi, les codes dits de référence, tels que ESP [Clarke 85], DOE-2, BLAST [Bauman 83] ou encore SERI-RES [Martin 93], ont été initialement développés sur des grands systèmes. Avec la montée en puissance des micro-ordinateurs, des équipes plus réduites ont mis au point des codes performants et on assiste par ailleurs à un glissement des poids lourds vers les petites plate-formes, en vue d'une diffusion plus aisée dans le milieu professionnel. Au départ, ces logiciels étaient alors le plus souvent monozones. C'était une hypothèse tout à fait réaliste sous réserve que les pièces aient un comportement identique (mêmes conditions d'exposition, de traitement d'air, constitution des parois, ...). Des exemples de ces outils sont QUICKTEMP [Joubert 89] ou CODYBA [Brau 87]. L'évolution s'est ensuite traduite par la prise en compte du multizonage, donnant naissance aux premières versions de logiciels tel que ESP [Clarke 85], BLAST [Bauman 83] ou COMFIE [Peuportier 90]. Ensuite, l'intégration réaliste des transferts aérauliques a longtemps constitué une difficulté majeure. La première raison avait trait à l'absence de modèles simples pour traiter les échanges au travers de grandes ouvertures (portes et fenêtres). Dans ce cas, la combinaison des effets moteurs peut conduire à la présence de débits en sens opposés au sein de la même ouverture. Depuis, des modèles ont été dégagés [Walton 84] et intégrés dans plusieurs codes de calcul dédiés à l'aéraulique tels que COMIS [Feustel 99], AIRNET [Walton 84] CONTAM93 [Walton 94], MOVECOMP [Heerlin 88] ou thermo-aérauliques tels que PASSPORT+ [Alvarez 97], TARP, ESP et notre code. La seconde difficulté est liée au caractère non linéaire du système en pressions dont la résolution est nécessaire pour déterminer les débits massiques. En plus des problèmes intrinsèques à ce système non linéaire



(difficultés de convergence en particulier), la mise en oeuvre du couplage thermo-aéraulique est problématique [Boyer 99].

Enfin, avec les progrès réalisés par la puissance des stations de travail courantes, la simulation thermique des bâtiments s'attaque depuis quelque temps à la résolution de problèmes complexes : bâtiments présentant un grand nombre de zones, prise en compte des phénomènes aérauliques, dispersion des polluants, migration de l'humidité à sein des parois, couplage systèmes de traitement d'air/ enveloppe, ...

### **2.1.1.2 Comment et pourquoi un développement spécifique**

La modélisation est un compromis entre précision et temps calcul. Compte tenu des différents objectifs poursuivis par l'utilisateur d'un modèle (par exemple estimation de consommations annuelles ou suivi horaire ou sub-horaire d'une température de surface particulière) et de la grande variété des cas rencontrés (par ex. de 1 à 100 zones), l'adéquation entre le modèle, le bâtiment, les objectifs et les contraintes de temps ne sont pas faciles à concilier. En matière de modélisation, la première partie de notre travail a été celle d'une contribution spécifique pour le traitement du problème thermo-aéraulique et des compromis précédents, dans le cadre de ma thèse de doctorat entre l'INSA de Lyon et l'université de la Réunion.

Le cahier des charges initial était celui d'une approche multimodèle de la simulation thermo-aéraulique de bâtiments multizone. Les aspects liés à l'aide à la conception ainsi que de recherche étaient alors intégrés au sein d'une application sous environnement *Windows®*. Le développement était resté d'une certaine manière proche de la modélisation physique des phénomènes de transferts élémentaires. Cette structure d'accueil est basée sur les transferts conductifs au sein de l'enveloppe autour desquels convection et rayonnement interviennent en condition aux limites. La modélisation des transferts par analogie thermo-électrique [Saulnier 81] [Saulnier 85], le couplage des échanges superficiels et le formalisme d'état qui en découle sont explicités dans la réf. [Boyer 96], disponible en annexe. Au départ d'une description quelconque de bâtiment, le mécanisme de génération du modèle thermique du bâtiment est explicité, passant par la génération pour chaque zone d'un modèle d'état. Le couplage thermique des zones entre elles est assuré par un procédé itératif. Les transferts aérauliques sont intégrés à l'aide d'un modèle en pression et une solution d'intégration des grandes ouvertures est proposée. La référence [Boyer 99] détaille la modélisation ainsi effectuée, la

---

génération du modèle aéraulique au départ de la description ainsi que certaines difficultés numériques liées à la résolution du système non linéaire.

L'aspect multi-modèle du code, intégré dès le départ du développement de l'application est explicité et illustré dans la référence [Boyer 98a] par des applications développées dans le cadre d'une thèse [Garde 97a].

Les principales caractéristiques initiales de notre application, associées à des aspects entrepris après le doctorat (validation, modélisation de systèmes, application ECODOM, ...) étant explicitées dans les publications annexées, nous n'avons pas jugé utile de détailler ces aspects au sein du texte.

Dans la dernière décennie, plus de 100 programmes de simulation ont ainsi été développés. Une grande majorité des codes s'attache au problème thermique, une autre au problème aéraulique et un nombre plus réduit traite du problème couplé. La résolution du problème thermo-aéraulique peut se faire en résolvant simultanément les équations associées à chaque pas de temps. Cette démarche est employée dans certains codes tels que CLIM2000, ALLAN ou SPARK. L'autre possibilité est résoudre de manière indépendante les équations respectives et d'assurer le couplage au moyen d'un schéma de résolution itératif basé sur la convergence des températures et des débits massiques. C'est la solution adoptée par ESP et CODYRUN.

Schneider [Schneider 95] propose une discussion sur les avantages et inconvénients des deux méthodes, en axant son analyse sur les aspects de temps calcul et de précision. Ainsi que remarqué par cet auteur, une certaine sensibilité de la méthode itérative au choix du coefficient de relation est à noter. Cependant, les deux modes de couplage fonctionnant correctement, de notre point de vue, cette méthode - que nous avons adoptée- possède trois avantages importants :

- La possibilité (réservée à un utilisateur expert) de régler le critère de convergence en fonction des objectifs de précision ou de temps calcul. A ce moment, le nombre d'itérations conditionne directement le temps calcul. Dans le cas où le choix est fait de ne pas itérer entre les deux modules, la démarche se rapproche du couplage de type *ping-pong* [Kafetzopoulos 95].
- La conservation de la stationnarité du problème thermique. Sous réserve (a) du choix adéquat des variables météorologiques et (b) du choix d'un schéma de couplage entre les

zones itératif, le problème thermique est alors stationnaire. Cette propriété est importante, car elle conditionne fortement des développements performants au niveau de la compréhension physique du problème (analyse modale, temps caractéristiques, ...) et du temps calcul (réduction modale). Nous y reviendrons au chapitre III traitant du formalisme d'état appliqué à notre domaine.

- La séparation d'un problème en deux sous problèmes, pour lesquels des modèles différents (et plus ou moins détaillés) pourront être mis en jeu. Vis à vis de l'implémentation, à partir du moment où les entrées et sorties de chacun de deux modèles sont fixées, pratiquement aucune restriction en terme de type de modèle (phénoménologique, boîte noire, ...) ne s'applique. Une perspective d'utilisation de cette architecture sera donné plus en avant, utilisant un réseau de neurones pour modéliser et simuler le comportement de l'une des zones d'un bâtiment multizone.

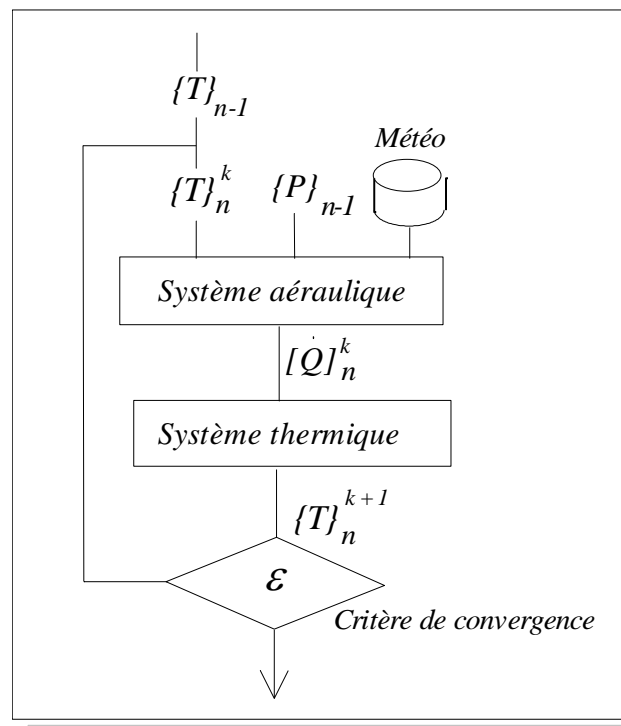


Figure 4 : Le système thermo-aéraulique

De par l'aspect aide à la conception, ces codes se doivent d'être applicables à tout type de bâtiment, sans que soient à priori fixés le zonage, la géométrie, les systèmes utilisés, les matériaux, ... Ainsi, en marge de la difficulté intrinsèque de modélisation des phénomènes, ce

type de code doit de plus prendre en charge la génération du (ou des) modèle(s) correspondant au bâtiment considéré et bien sûr de la résolution des équations associées. C'est un aspect auquel nous nous sommes intéressés spécifiquement, très peu documenté (excepté pour ESP) et le lecteur intéressé par ce point se rapportera aux deux premières publications en annexe.

En remontant quelques années en arrière, la question peut à posteriori se poser quand à la pertinence d'une telle entreprise, dans un environnement international concurrentiel (voir le nombre de codes existants) et dans une équipe en cours de constitution. En effet, un code spécifique tel que le notre pose d'abord des difficultés en terme de développement, mais aussi en terme de maintenance, surtout comme cela a été le cas pour nous en cas d'apports successifs. En définitive, le choix de cette stratégie initiale *code détaillé* a constitué un pari dont les résultats nous paraissent probants, tant du point de vue des résultats que des applications à grande échelle. Par la suite, un autre élément déterminant a été notre éloignement des centres de recherche de notre domaine, nous ayant alors conduit à entreprendre de manière très autonome l'étape de validation, sur des supports uniques en climat tropical humide.

## 2.1.2 Les principaux apports post thèse en modélisation

En thermique du bâtiment, ainsi qu'exposé ci-après, j'ai défini de façon très autonome différents prolongements dans le cadre de la mise en place de la thématique de notre groupe. Ayant par ailleurs assuré le développement informatique lors de mon doctorat, dans un souci d'efficacité, j'ai moi même programmé dans *CODYRUN* l'ensemble des modules dont il est question dans les paragraphes suivants, tant vis à vis des aspects recherche que d'aide à la conception.

### 2.1.2.1 Vis à vis de l'aspect recherche

En raison de l'entière maîtrise du code et du caractère très modulaire de l'ensemble construit, *CODYRUN* constitue une structure d'accueil de modèles élémentaires combinables entre eux pour donner un modèle global de bâtiment.

#### 2.1.2.1.1 Intégration des STA du type split-system

Devant le développement important de la climatisation, que ce soit dans le domaine du tertiaire ou du résidentiel, il est important d'estimer dès la phase conception les

consommations d'énergie le plus précisément possible. Seule une modélisation correcte des installations de climatisation, et du couplage avec l'enveloppe permet d'estimer ces consommations.

Le plus souvent, les systèmes sont souvent dimensionnés pour des conditions extrêmes et leur fonctionnement réel atteint rarement 60% de la puissance pour laquelle ils ont été dimensionnés. Dans le cadre d'une partie de la thèse de F. Garde [Garde 97a], nous apportons une contribution à la modélisation des systèmes de climatisation et leur intégration dans le code de calcul *CODYRUN*. Nous nous sommes concentrés sur la modélisation des systèmes de climatisation individuelle à détente directe (split system), ce type d'appareil - principalement utilisé dans les secteurs résidentiel et petit tertiaire - présentant un fort potentiel de développement dans les années à venir.

La bibliographie sur le sujet nous a amené à deux constats ayant guidé notre approche

- Les modèles disponibles forment deux ensembles très distincts : ceux simplistes (régulation idéale, COP constant, ... ) ou très détaillée (couplage de modèles unitaires de parties du systèmes tels que batteries, condenseur, ...)
- très peu d'auteurs couplent les modèles de STA et d'enveloppe. Dans la réalité, cette démarche est nécessaire car les performances de l'appareil dépendent des conditions extérieures et intérieures.

Compte tenu de notre stratégie initiale multi-modèle, trois modèles de niveaux différents ont été développés :

- Le modèle 0 est un modèle horaire idéal qui détermine les charges sensibles et latentes nécessaires pour maintenir une température et une humidité relative fixées pour un pas de temps horaire. Le système est seulement modélisé par son efficacité frigorifique en régime nominal.
- Le modèle 1 à pas de temps réduit intègre le régime dynamique de l'appareil par une équation du premier ordre. La régulation en tout ou rien est également modélisée. Les puissances frigorifiques et puissance absorbée en régime permanent sont les valeurs du régime nominal.
- Le modèle 2 à pas de temps réduit intègre également le régime dynamique et la régulation en tout ou rien. De plus, les puissances frigorifiques et absorbées en régime permanent dépendent des températures d'air intérieures et extérieures ainsi que de l'humidité intérieure. Ce modèle est un modèle de comportement dont les

équations de régression ont été déterminées à l'aide d'un tableau de données constructeur (pour un modèle spécifique de climatiseur).

A chaque pas de temps, le modèle de système de traitement d'air calcule les puissances sensible et latente et les injecte dans les équations de bilan thermo-convectif de l'air de la zone concernée et de bilan d'humidité spécifique (faisant respectivement partie des modèles thermique et de transfert d'humidité).

Les deux derniers modèles nécessitent un pas de l'ordre de la minute, alors que *CODYRUN* utilisait jusqu'alors un fichier horaire. A la reconnaissance automatique du pas de temps près, vis à vis de la résolution numérique, aucun problème particulier n'est rencontré car le schéma de résolution adopté initialement est implicite. Compte tenu du souhait de conserver la compatibilité des formats de fichiers météorologiques entre *CODYBA* et *CODYRUN*, une astuce a du être trouvée, seules les heures entières (i.e. de 0 à 23) étant enregistrées dans ce fichier. Lors de l'ouverture d'un fichier de sollicitations, l'application compte le nombre  $n$  d'articles possédant la valeur du champ *heure* et détecte que le pas de temps est de  $(3600 / n)$  secondes.

La fenêtre suivante est celle du composant système de traitement d'air du type split system, faisant apparaître les différents niveaux de modélisation disponibles.

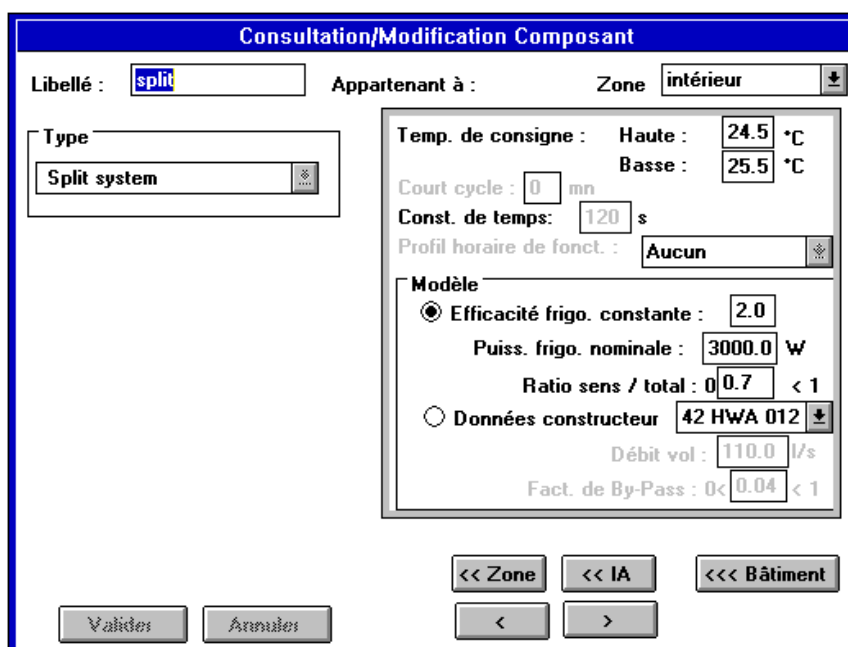


Figure 5 : Fenêtre du composant split-system

Pour atteindre l'objectif final qui est la validation des modèles et le couplage système enveloppe, une méthodologie reposant sur trois phases indispensables a été suivie :

1. Validation de l'enveloppe en passif, i.e. sans système de climatisation [Lucas 98]
2. Détermination des paramètres de fonctionnement propre au système de climatisation par identification expérimentale des paramètres de fonctionnement du système. (constante de temps, temps de court cycle, dead-band, ...) [Lucas 97]
3. Validation du modèle d'enveloppe couplé avec le système [Garde 97b]

Une fois le système de climatisation et l'enveloppe connus avec précision, nous pouvons procéder à des comparaisons entre l'expérience et le modèle d'enveloppe couplé avec le système de climatisation.

Les courbes suivantes illustrent des confrontations mesure modèle en température sèche, ainsi qu'en puissance frigorifique :

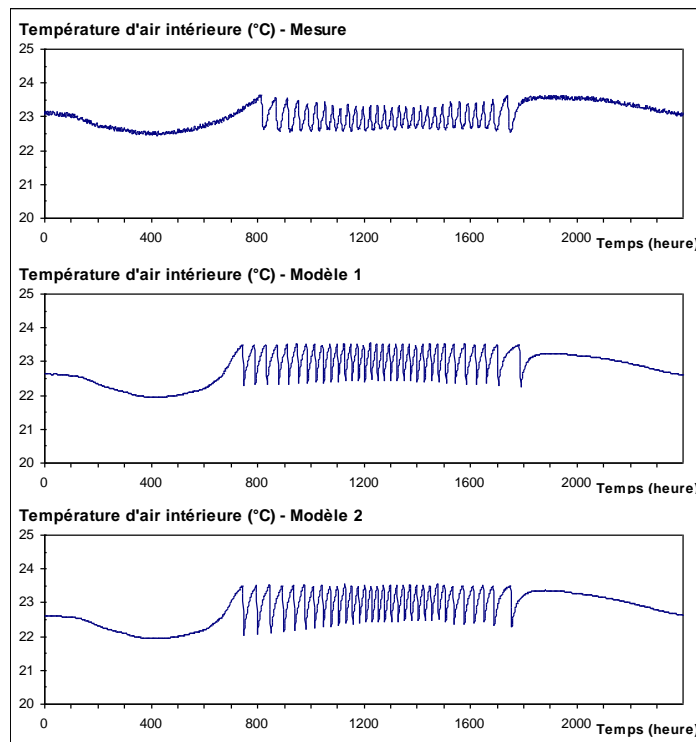


Figure 6 : Evolution de la température sèche d'air pour un pas de temps de 1 minute -  
Comparaison Mesure/Modèle 1/Modèle 2 -

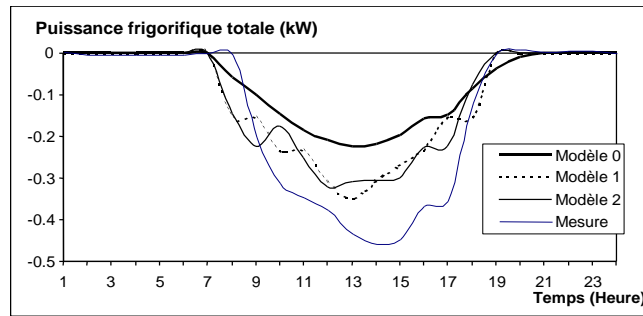


Figure 7 : Comparaison des modèles 0, 1, 2 pour un pas de temps de 1 heure.

Nous avons montré [Garde 97b] que le modèle horaire devient très imprécis pour des taux de charge compris entre 20 et 60 % et dans quelle mesure les modèles détaillés et l'approche multi-modèle pour un même code de calcul permettent d'améliorer la modélisation du couplage enveloppe/bâtiment ainsi que la fiabilité des résultats du modèle. Les futurs travaux vont donc porter sur l'amélioration de la précision d'un modèle horaire qui tienne compte du taux de marche de l'appareil et des conditions intérieures et extérieures, le pas de temps horaire restant le pas de temps de référence des codes de simulation.

#### 2.1.2.1.2 Modèles de température du ciel

Cet aspect est apparu lors de la validation du code sur des bâtiments à structure légère. Sur l'un des supports décrits dans [Garde 97a], l'analyse de sensibilité (réalisée manuellement) avait illustré la sensibilité importante du modèle de bâtiment considéré aux transferts radiatifs de grande longueur d'onde avec le ciel. Nous avons alors intégré différents modèles de température du ciel, sans grand succès. En effet, sur la séquence de l'expérimentation, la comparaison des différentes corrélations donnant la température équivalente de ciel menait à des valeurs très différentes d'un auteur à l'autre. Nous avons par la suite été guidés par [Berger 84] qui souligne :

- d'une part le défaut intrinsèque de cette démarche visant à établir une corrélation entre une température représentative d'échanges avec la voûte céleste et des paramètres locaux (température sèche d'air extérieur, humidité, ...).
- d'autre part le caractère très local des corrélations obtenues dans le sens où elles ne sont pas transposables à un autre site.

Nous nous sommes orientés vers la mesure du flux radiatif de grande longueur d'onde, à l'aide d'un pygéomètre et d'une démarche expérimentale simplifiée [Calogine 96]. Par



ailleurs, pour améliorer la prédiction de cette excitation pour un site non instrumenté, une modélisation à l'aide de réseaux de neurones a été confrontée avec succès aux mesures sur le site de Saint-Denis [Adelard 98b].

#### 2.1.2.1.3 Prise en compte des échanges convectifs extérieurs

Les expérimentations sur la cellule nous ont amené à compléter les corrélations existantes pour les parois verticales. Pour les parois horizontales, nous utilisons une corrélation établie par [Tourrand 91]. Il est au passage assez étonnant de constater que peu de codes offrent la possibilité de la prise en compte du vent dans le calcul du coefficient d'échange, surtout en regard de la sensibilité de modèles à ces coefficients pour des bâtiments à faible inertie.

#### 2.1.2.1.4 Charges internes à évolution spécifique

Grâce à l'intégration de ce composant, nous avons pu confronter *CODYRUN* aux mesures associées aux cellules ETNA (EDF DER). Il s'agit de cellules monozones dans lesquelles l'évolution d'une charge interne (convecteur) est décrite au moyen d'un fichier. En effet, l'injection de la puissance est commandée par une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA) qui approxime un bruit blanc discret et donc présentent un contenu riche en fréquences. La fenêtre suivante est celle du *composant Charge interne*.

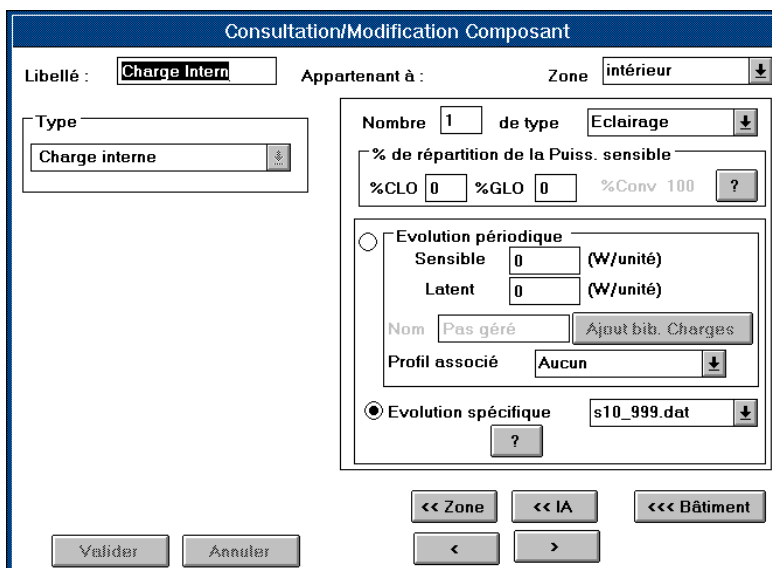


Figure 8: Fenêtre de description du composant charge interne

En plus des informations antérieures, il est maintenant possible de choisir pour une charge interne une évolution dite spécifique, en ce que les puissances associées (sensible et latente) sont décrites à chaque pas de temps dans un fichier (*s10\_999.dat* dans le cas présenté). En liaison avec la validation expérimentale, l'intérêt est de pouvoir injecter dans le local une charge interne contrôlée (convecteur par exemple) et de juger assez précisément de la justesse de la modélisation du système associé. En effet, le principal problème rencontré lors de l'application des techniques de traitement de signal (application de la DSPi du résidu pour exhiber les entrées responsables des écarts mesure modèle) est lié aux corrélations existant entre les différentes entrées du modèle (température et rayonnement par exemple). En s'autorisant la possibilité de l'évolution contrôlée d'une charge interne, la quantification de la causalité des relations entrées – erreur est améliorée. Le résultat des comparaisons modèle/mesure sont présentées plus en avant.

#### 2.1.2.1.5 La refonte de l'application

L'application développée entre 1991 et nos jours a été initiée sous l'environnement QC/Windows. Un premier développement en cours consiste en la recompilation en environnement 32 bits, sous Visual C++. La raison première est liée à la maintenance, le debugger initial fonctionnant mal avec des applications aussi volumineuses que notre code de calcul. Par ailleurs, vis à vis de la poursuite de nos travaux (voir chapitres suivants) et de leur intégration future à *CODYRUN*, d'autres aspects sont actuellement revus lors de cette étape et concernent :

- Le découplage complet des aspects d'interface et de calcul. La séparation des deux aspects précédents permet une meilleure communication entre applications, les fichiers intermédiaires (ou boîte aux lettres) reconnus de part et d'autre servant de passerelle. De plus, cette séparation a aussi pour conséquence appréciable la portabilité quasi immédiate du noyau de calcul vers d'autres systèmes. Une version *DOS* (avec cependant des modèles élémentaires figés) de *CODYRUN* fonctionne actuellement, admettant en entrée des fichiers bâtiments décrits au préalable. Enfin, cette séparation facilite le découplage des aspects d'analyse de sensibilité et d'incertitude du module de simulation, ainsi que présenté par [Fürbringer 92]. Le module d'analyse de sensibilité devient alors indépendant du modèle dont la sensibilité est analysée. Nous verrons au chapitre II que cette démarche n'a pas été

choisie dans un premier temps dans notre application, dans un souci de mise en oeuvre rapide d'une méthode d'analyse d'incertitude dans *CODYRUN*.

- La modification du formalisme interne. Le système thermique mis sous forme d'état et son intégration dans notre application ne permet pas l'utilisation efficace de méthodes de réduction issues de l'automatique (voir chapitre III).

### **2.1.2.2 Vis à vis de l'aide à la conception**

Il s'agit de compléments apportés au modèle de base, tant au niveau de l'intégration de nouveaux composants ou encore de fonctionnalités ajoutées au logiciel. La réflexion sur le label ECODOM [Garde 99, en annexe] ayant été entamée dès 1995, il nous a fallu, en parallèle aux aspects strictement scientifiques, amener l'application au niveau d'un véritable outil de conception. Ces développements font partie intégrante de notre stratégie (prestations, contrats de simulations, rentrées financières, ...).

#### **2.1.2.2.1 Masques**

Ces aspects ont été traités dans les années passées au sein du laboratoire ou encore au travers de la littérature. Ainsi, les approches initiales se ramenant à des analyses par composant (étude dédiée aux masques proches, au comportement d'une toiture dalle, ...), toute une panoplie de méthodes est disponible dans la bibliographie. L'intégration des masques lointains s'est faite de manière classique, avec en commentaire particulier l'intégration de la saisie du profil angulaire par secteur de  $10^\circ$  à l'aide de 36 curseurs, permettant ainsi une saisie visuelle du masque. Pour les masques proches, les méthodes basées sur des relations trigonométriques (projection des arrêtes de masques, ...) se heurtent rapidement à la combinaison sur un même vitrage de plusieurs types de masques (casquette + auvent par exemple). Notre choix s'est arrêté sur une discrétisation de la surface des vitrages en 300 (20 x 15) points et la détermination de l'état d'éclairement de chaque point. Cette méthode dite du quadrillage [Cacavelli 82] permet d'approcher le facteur solaire comme étant égal au nombre de points éclairés sur le nombre de points total et s'accommode fort bien de la combinaison de masques proches. Des comparaisons de valeurs horaires sur des séquences

journalières ont été conduites avec *CODYBA* et ont permis de valider cet aspect. Nous avons prévu de conduire par ailleurs quelques expérimentations autour de la cellule, en y ajoutant des masques proches plus complexes.

La partie existante concerne les masques habituels (casquette, auvent, ...). Cependant, les contraintes d'éclairage intérieur ou d'esthétique amènent de plus en plus souvent les concepteurs à intégrer des masques plus complexes, par exemple résillés ou constitués de lamelles disjointes permettant d'occulter une partie du rayonnement direct et de conserver une partie plus importante du diffus. Des travaux spécifiques (tant expérimentaux que géométriques) mériteraient d'être menés. Vis à vis de leur modélisation, en conservant à l'esprit la contrainte de temps calcul inhérente aux outils d'aide à la conception, les réseaux de neurones constitueraient une méthode particulièrement attractive.

#### 2.1.2.2.2 Parois sur vide sanitaire

Nous avons l'intention de conduire des confrontations avec des mesures concernant les cellules BRE (programme de recherche Européen PASCOOL), ayant pour particularité d'être sur pilotis (30 cm au dessus du sol). Un développement spécifique a été entrepris, les codes n'intégrant pas les parois sur vide sanitaire ne pouvant pas modéliser ce type de cellule. Le nœud de sous face de la paroi sous vide sanitaire échange par convection avec  $T_{lnc}$  (température du local non chauffé ou vide sanitaire) et par rayonnement de grande longueur d'onde avec son environnement (supposé à la même température). Par rapport à la liste des types <sup>(2)</sup> de nœuds (listés dans [Boyer 96]), il nous a fallu rajouter un nouveau type, de surface inférieur de paroi sur vide sanitaire. Vis à vis du détail des calculs, une simplification a été adoptée lors du calcul de  $T_{lnc}$  si  $Tau$  n'est pas égal à 1 (rappel :  $Tau = \frac{(T_{ai} - T_{lnc})}{(T_{ai} - T_{ae})}$  cf DTU). Au départ de la donnée de  $Tau$  la détermination  $T_{lnc}$  nécessite celle de  $T_{ai}$  (température sèche d'air intérieur). La valeur de cette température au pas de temps précédent est alors utilisée.

Vis à vis de la description du bâtiment, le composant Paroi sur Vide sanitaire ne peut appartenir qu'à une interambiance de type séparation avec le sol.

---

<sup>2</sup> Associé à un nœud, le type est une information permettant de déterminer les phénomènes de transfert le concernant et faciliter le remplissage des objets (matrices et vecteurs) constitutifs de son équation de bilan thermique.

#### 2.1.2.2.3 Doubles vitrages

Notre volonté de confronter notre modélisation à des standards nationaux internationaux (BRE, BESTEST, ETNA décrits pour certains plus en avant) nous a amenés à l'intégration de ces composants, de même que les parois sur vide sanitaire évoquées précédemment. La modélisation des transferts radiatifs de courte longueur d'onde ne pose pas de problème spécifique, l'objectif étant de calculer les coefficients ( $\alpha$ ,  $\rho$  et  $\tau$ ) vis à vis du direct pour chaque angle d'incidence et ces mêmes coefficients pour le diffus du vitrage ainsi constitué. En terme d'intégration, notre choix s'est porté sur la donnée de ces coefficients (disponibles pour les assemblages courants) ou le calcul effectif des propriétés du double vitrage au départ des caractéristiques de chaque vitrage.

#### 2.1.2.2.4 Divers

A l'usage, diverses améliorations ont été apportées pour une plus grande convivialité du code. C'est ainsi que l'aide en ligne hypertexte de l'application a été réalisée. Ce n'est pas une version finale, car en fait pour un cheminement didactique et progressif dans l'aide, une analyse plus longue est nécessaire. Nécessité nous est aussi apparue de séparer les aspects descriptifs du bâtiment et ceux liés à la modélisation des phénomènes. A l'aide d'un mot de passe, tous les champs d'information relatifs à cette dernière partie sont affichés (voir fig.3, p.22) Il en est de même pour les paramètres de résolution, les options de sorties, .... Plusieurs niveaux d'approche du code sont alors possibles.

Plus localement, diverses améliorations ont été apportées, telles que la gestion

- de bibliothèques
- d'une fenêtre d'information sur le fichier de sollicitations météorologiques (pas de temps, nombre de jours, ...)
- du copier coller (appliqué aux composants de l'entité bâtiment)
- la possibilité de saisie d'un champ texte de commentaire au niveau de la fenêtre bâtiment (fig.3, p.22). En effet, lors des étapes de modélisation, de validation, il n'est pas rare d'avoir plusieurs versions du même bâtiment, qui ne diffèrent que du choix local d'un modèle ou autre. Ce champ de commentaire est alors d'une grande utilité.

#### 2.1.2.3 Nos autres environnements de modélisation

Au fur et à mesure de l'avancement de nos travaux, l'évidence s'est imposée quand à l'impossibilité de tout développer de façon spécifique comme pour *CODYRUN*. En effet, les

---

langages évolués exigent en durée des frais fixes de formation qui ne sont pas compatibles avec la durée d'une étude (stage, projet, ...). Ne pouvant pour ma part continuer à développer sur plusieurs fronts en parallèle à mes autres activités, nous avons alors décidé d'utiliser deux autres environnements très différents, mais possédant chacun leurs avantages spécifiques :

- **MATLAB**

Nous utilisons cette plateforme à des fins de prototypage rapide d'applications. En utilisant les boites à outils disponibles, des programmes spécifiques ont été développés pour la cellule expérimentale *LGI*, l'analyse de sensibilité, l'analyse spectrale du résidu, l'apport du temps fréquence, ... Dans certains cas comme par exemple l'analyse de sensibilité, *MATLAB* sert de banc d'essai avant intégration dans *CODYRUN*.

- **TRNSYS**

En thermique et énergétique solaire, cet environnement est une référence pour les utilisateurs proches de la physique des phénomènes. Le principe est celui de l'assemblage de types élémentaires (modules *FORTRAN*) pour former un modèle global. Sa vocation première était celle de la simulation simultanée du bâtiment et des systèmes associés (capteurs solaires, ...). Par rapport aux versions premières, cet environnement s'est enrichi par de l'apport d'interfaces utilisateur conviviales ou encore du couplage avec d'autres programmes (*AUTOCAD*, *COMIS*, ...). Un intérêt majeur en est la disponibilité de modules développés de par le monde, tant par des organismes publics (universités, laboratoires, ...) que privés (sociétés d'ingénierie dédiées, bureaux d'études, ...).

## **2.2 Contribution en modélisation dans des domaines connexes**

### **2.2.1 Thermique urbaine**

Ces travaux visaient à la modélisation du comportement thermique d'un espace urbain de type *Rue*, soumis aux sollicitations météorologiques extérieures [Pignolet Tardan 96]. La part d'encadrement de doctorat (20 %) a conduit à l'élaboration d'un modèle nodal très similaire à celui de *CODYRUN* (la structure de maillage est une partie centrale du code, au départ de laquelle l'ensemble des objets liés au modèle mathématique sont construits), permettant la simulation à des fins de confort du canyon urbain. Une démarche modulaire de couplage des phénomènes élémentaires (vus précédemment pour l'étude du bâtiment, à savoir

conduction, convection et échanges superficiels [Boyer 96, en annexe]) et d'implantation multi-modèle [Boyer 98a, en annexe] a aussi été utilisée.

En présence du vent, de par la prédominance des effets aérauliques dans ce système [Ca 95], un pré-calcul des vitesses d'air au voisinage des surfaces exposées a été effectué en utilisant le code de mécanique des fluides *FLUENT*. Des résultats provenant du prototype de calcul alors développé (*CODYFLOW*) sont présentés dans la référence [Pignolet-Tardan 97], mettant en exergue l'influence de nombreux facteurs sur le comportement thermique du canyon urbain (orientation, choix des matériaux , ...).

Dans ce domaine où assez peu de travaux ont été publiés, cette étude constitue une base, qui associée à d'autres configurations urbaines, pose les prémices d'un futur outil de conception en thermique urbaine où se posent de plus en plus de problèmes relatifs au confort en milieu extérieur.

### 2.2.2 Génération de séquences climatiques

Bien que cette thématique soit en amont de nos travaux en thermique des bâtiments, elle s'inscrit tout à fait dans le même axe, visant à une meilleure caractérisation et prise en compte des sollicitations météorologiques [Adelard 98a]. En effet, l'accroissement simultané des connaissances et des moyens de calcul a rendu nécessaire cette étude ciblée sur les entrées de notre système, pour être par la suite mieux à même de comprendre in fine l'interaction sollicitations – réponses. Pour se fixer un ordre d'idées, sur les 15 dernières années, il faut savoir qu'environ 100 codes de simulation ont été développés en thermique des bâtiments, alors que moins de 5 applications dédiées aux séquences climatiques sont référencés dans la bibliographie.

L'objectif était alors de mettre au point un générateur de climat reposant sur des corrélations établies pour les séquences climatiques caractérisées. Pour ce faire, diverses techniques d'analyse et de modélisation ont été mises en œuvre, faisant appel à plusieurs domaines tels que la statistique, le traitement de signal ou encore les réseaux de neurones. Ces derniers ont été utilisés pour reconstituer la température équivalente de ciel [Adelard 98b].

Cette étape était d'ailleurs nécessaire pour la méthodologie du label ECODOM, le choix de bâtiments type (individuel et collectif), devant s'accompagner de fichiers de sollicitations météorologiques caractéristiques de séquences climatiques particulières. La référence [Adelard 99] présente globalement l'approche ainsi que l'intérêt de la

caractérisation fine des séquences de sollicitations en montrant (à l'aide de *CODYRUN*) la sensibilité d'un modèle d'enveloppe aux variables météorologiques.

Vis à vis des suites de ce travail, le code issu de cette thèse (*RUNEOLE*) s'est réalisé sous *MATLAB* et est en cours de portage sur *TRNSYS*. Par ailleurs, nos préoccupations actuelles liées à l'analyse de sensibilité et d'incertitude nous amèneront à reconsidérer cette partie, en particulier lors de l'étude (à intégrer à *CODYRUN*) de la sensibilité aux paramètres météorologiques (non paramétrique) de modèles d'enveloppe.

### 2.2.3 Modélisation en Génie des procédés :

L'expérience professionnelle pré-thèse acquise dans le domaine de l'automatique industrielle en milieu sucrier m'a amené à collaborer à un doctorat [Lauret 98], ayant trait à la modélisation et au contrôle du procédé de cristallisation et donnant lieu à deux articles publiés [Lauret 99a, b]. Ne se situant pas dans l'axe de nos travaux en thermique des bâtiments, cette partie n'est pas développée dans ce mémoire. Toutefois, le paragraphe suivant trace les perspectives de la méthode de modélisation alors retenue (hybride, c'est à dire combinant une partie déterministe et une autre neuronale) dans notre domaine.

## 2.3 Perspectives liées à la modélisation hybride

La modélisation à base de modèles de connaissance et la génération automatique de ce type de modèles est un domaine bien maîtrisé, sous réserve de la capacité à construire des modèles élémentaires équationnels (modèles boîte blanche) de préférence linéaires. En thermique des bâtiments, ces limitations concernent certains points tels que la ventilation naturelle, certains composants de l'enveloppe pour lesquels les phénomènes de transferts sont très couplés ou fortement non linéaires (parois complexes, Isolants Mince Réfléchissants, ...) ou encore les systèmes de traitement d'air.

Par ailleurs, la modélisation à base de réseaux de neurones (RN), du type boîte noire, connaît une diffusion très importante, dans des disciplines aussi variées que l'énergétique, la mécanique, l'automatique, ... . En particulier dans notre domaine, ce type de modèle a été utilisé pour les systèmes de traitement d'air (pris cependant indépendamment de l'enveloppe), la ventilation naturelle ou encore la reconstitution de paramètres météorologiques.



Entre ces deux aspects, un axe intéressant est celui de la modélisation hybride (ou modèle gris), faisant intervenir généralement des modèles élémentaires déterministes (équationnels) et localement un (ou des) réseau(x) de neurones pour des composants pour lesquels des mesures ont pu être faites. En particulier dans le cas de la thermique du bâtiment pour lequel l'objet d'étude est décrit par un assemblage de composants élémentaires, une attention particulière est apportée à la génération automatique de ce type de modèles et de l'analyse des couplages des sous-systèmes.

Dans notre environnement, cet axe s'inscrit de façon très complémentaire à notre thématique tant du point de vue

- de l'expérimentation nécessaire à l'apprentissage (supports expérimentaux dédiés tels que cellule *LGI*, *ISOTEST*, *STA-TRON*)
- de l'intégration dans nos environnements de modélisation. *TRNSYS* de part sa structure modulaire a déjà fait l'objet d'intégration de composants neuronaux. Dans *CODYRUN*, les premiers essais sont en cours.
- des applications : la modélisation de composants spécifiques (par exemple de toiture intégrant des IMR) pourrait trouver des applications importantes dans le cadre d'*ECODOM*.

Ainsi que présenté précédemment les RN peuvent être utilisés à profit pour modéliser localement un aspect spécifique (système ou composant) en vue du couplage dans le modèle global du bâtiment. Rappelons tout de même que cette technique de prime à bord séduisante nécessite l'apprentissage du réseau et donc des bases de données expérimentales importantes. Cet aspect est à relier avec la mise en place de nouveaux supports de mesure présentés plus en avant.

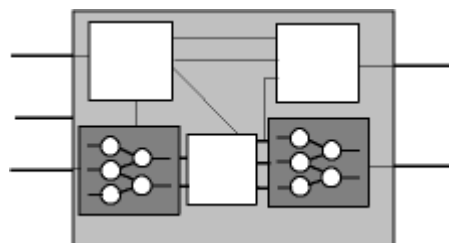


Figure 9: Modélisation locale à RN dans un modèle global.

Dans cette optique, cette technique de modélisation se conçoit comme très similaire à celle qui avait été entreprise au sein de *CODYRUN* pour la modélisation des systèmes de traitement d'air du type split system (cf paragraphes précédents). A la place d'équations de

régression donnant les puissances délivrées par l'appareil et injectées au local, le réseau constitué serait chargé de cette opération, avec pour entrées les conditions en températures sèches intérieures et intérieures, ainsi que l'humidité intérieure. La méthode de régression (ou modèle niveau 2, basée sur un pas de temps de la minute) dans sa confrontation avec l'expérimentation nous avait conduit à un ajustement du modèle visant à annuler la puissance de déshumidification lorsque le poids d'eau par kilo d'air à l'intérieur du local devenait inférieur à une certaine quantité. Dans un modèle à base de RN, il sera nécessaire de conserver cette limitation de la déshumidification. Cette correction constitue une injection de connaissance à priori dans la modélisation (*quel que soit le système, compte tenu des infiltrations et des échanges avec le mobilier, le poids d'eau intérieur ne peut descendre en dessous de 4 g d'eau par kg d'air sec*), laquelle démarche s'est avérée très intéressante dans beaucoup de domaines, visant ainsi à sécuriser l'utilisation aveugle des RN [Georgakis 95].

Une autre application intéressante serait celle de l'utilisation des réseaux pour l'amélioration du temps calcul. En effet, nous avons souligné que la prise en compte du multizonage conduisait à des temps calculs importants en raison de la taille des système mis en jeu. Par ailleurs, les couplages entre les sous-systèmes que constituent les zones sont le plus souvent faibles (sauf dans le cas de couplage aérauliques forts). Pour une modélisation nécessitant un temps calcul important (ex : Etude fine d'une pièce équipée d'un split avec un pas de temps de la minute pour une séquence de quelques jours au sein d'un bâtiment multizone), une stratégie de résolution pourrait être :

- la simulation classique sur quelques jours, avec pour objectif de constituer une base d'apprentissage des températures des zones adjacentes.
- l'établissement en ligne des réseaux pour l'estimation des températures adjacentes (sèches et radiantes moyennes, car nécessaires au couplage des zones entre elles)
- la poursuite de la simulation en utilisant pour les pièces adjacentes les RN.

Bien que celà reste à vérifier, cette démarche devrait apporter des gains de temps calcul importants, surtout dans le cas de nouvelles simulations pour tester une variante du projet ou encore de l'analyse de sensibilité de modèles.

### **3 CONTRIBUTION A LA VALIDATION :**

Bien que mon doctorat était centré sur la modélisation et la simulation, la validation du code a été initiée à ce moment, en particulier au travers de tests de cohérence et de bonne implantation numérique, des confrontations avec des cas analytiques ainsi que des comparaisons inter-logiciels [Boyer 93].

Dans notre domaine, différents laboratoires de recherche se sont intéressés spécifiquement à la validation des codes de calcul en thermique du bâtiment, et ce depuis de nombreuses années [Brau 80]. Un tel travail nécessitant une méthodologie, certains laboratoires se sont plus intéressés à l'élaboration de méthodologies de validation qu'au développement de leur code. C'est le SERI (devenu depuis le NERL : National Energy Research Laboratory) qui proposa la première méthodologie de validation. Celle-ci composée de 3 étapes fut utilisée par le BRE, comme support de base à l'élaboration d'une méthodologie plus complète à laquelle nous adhérons :

- Vérification de la théorie de base des modèles élémentaires
- Vérification du bon fonctionnement numérique
- Comparaison inter-logiciel
- Vérification analytique des modèles élémentaires
- Analyse de sensibilité
- Validation expérimentale

#### **3.1 Les supports de mesure**

Correspondant à la dernière étape de la méthodologie précédente, cette partie a été initiée à la fin de la partie modélisation (fin 1993) et explicitée dans le détail dans le document [Garde 97]. Cette référence mentionne en particulier les capteurs utilisés ou encore le protocole des mesures. Nous évoquerons la mise en place d'un support dédié à des mesures en laboratoire, les cas de validation sur des habitations existantes ainsi que deux autres cellules en cours de développement. Vis à vis de la qualité des mesures conduites, nous nous somme

appuyés sur la travaux de Lomas pour constituer des Données de Haute Qualité [Lomas 91], de par le respect de critères portant sur l'enveloppe et les données mesurées.

### 3.1.1 La cellule LGI

La validation s'avérant une nécessité impérative pour la suite de nos travaux, j'ai été chargé de concevoir une cellule permettant de répondre à un double objectif, validation et prestations de mesures dans le cadre de contrats.

Une cellule expérimentale de laboratoire financée par l'ADEME, baptisée cellule LGI, a donc été réalisée avec un caractère modulable, de manière à pouvoir étudier à l'aide du même bâti différentes configurations (orientation, cloisons amovibles, masques, parois interchangeables, ...) et différents phénomènes (conduction dans des parois composites, couplages radiatifs intérieurs, ...). D'un volume de 20 m<sup>3</sup>, ses dimensions sont proches d'une pièce classique de type chambre à coucher ou bureau.

Dans notre démarche de validation, les objectifs de la cellule ont été multiples :

- améliorer la précision des caractéristiques thermo-physiques des matériaux mis en œuvre par rapport à un habitat existant
- réaliser des tests de composants et de systèmes afin de mesurer les performances thermiques de divers matériaux et de déterminer leur influence sur le confort thermique.
- les performances énergétiques de l'appareil et les couplages enveloppe/système;
- permettre l'instrumentation de systèmes de traitement d'air.

La cellule a une surface intérieure au sol de 9 m<sup>2</sup>, une hauteur de 2.20 m et occupe un volume intérieur de 20 m<sup>3</sup>. Elle est constituée fonctionnellement par une ossature métallique auto-portante, un ensemble de parois fermées démontables, un vitrage ordinaire de 0.8 m x 0.8 m, une porte PIC83 classique et un système de traitement d'air type split-système, avec une unité intérieure murale et une unité extérieure.

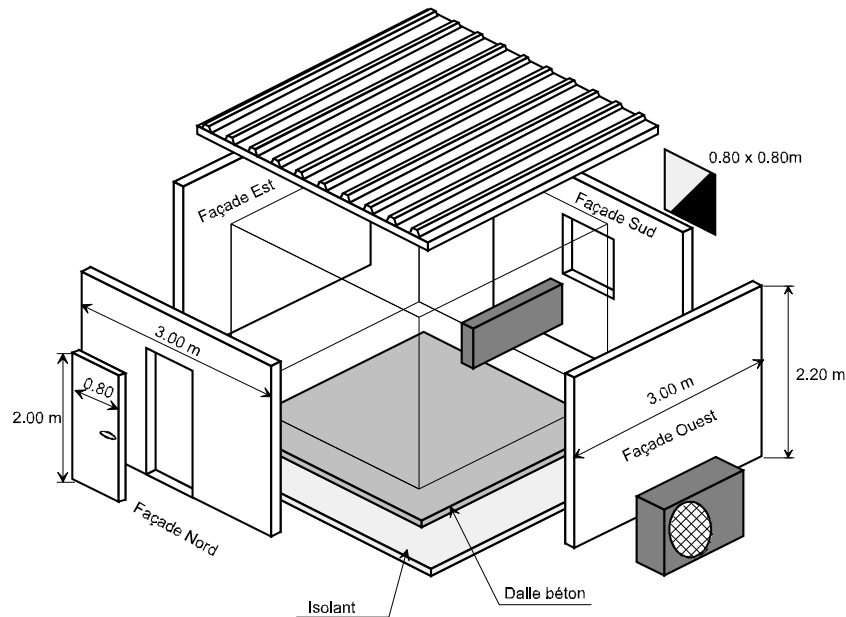


Figure 10 : Perspective isométrique de la cellule

Initialement disposée sur le toit de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université, cette cellule a été réinstallée sur le site de l'IUT de Saint-Pierre, avec une instrumentation spécifique de la dalle en lien avec des méthodes inverses (cf. chap. III, *Observateurs appliqués à la mesure en thermique*).

Par ailleurs, une extension du support est prévue, permettant ultérieurement l'accolage de deux cellules identiques

- couplées par une ouverture pour des études spécifiques liées à l'aérodynamique intérieure.
- découplées pour des comparaisons de stratégies de contrôle de systèmes de traitement d'air (cf. chap. III, *Utilisation de la forme d'état en régulation*)

Sur ce support dédié, les résultats de la confrontation mesure modèle sont probants, ainsi que le montre le résidu tracé sur la figure ci-dessous pour une séquence d'hiver austral en mode passif de 15 jours (moyenne du résidu  $0.28\text{ °C}$  , écart type  $0.5\text{ °C}$ ). L'écart type de l'erreur étant sensiblement égal à la précision de la mesure ( $\pm 0.5\text{ °C}$  pour les thermocouples), aucune amélioration détectable du modèle n'est alors envisageable.

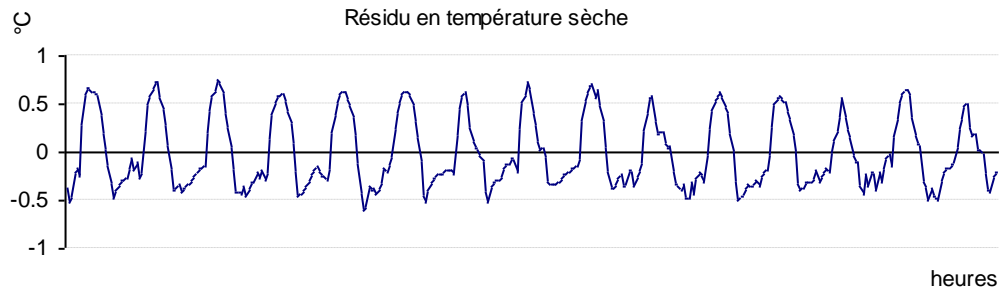


Figure 11: Résidu en température sèche, cellule LGI

Pour tempérer ce constat, il est bon de conserver à l'esprit le fait que cette cellule constitue en réalité un bâtiment très simple, dont la conception a été effectuée en regard des préoccupations de la validation (pas de ponts thermiques, quasi absence d'infiltrations de par une étanchéité à l'air soignée, caractéristiques thermo-physiques des matériaux bien maîtrisées, limitations des transferts avec le sol du bâtiment par isolation). Pour le mode actif, des confrontations (utilisant le même support expérimental) centrées sur la validation des modèles de systèmes de traitement d'air ont été présentées précédemment.

### 3.1.2 Les supports en environnement naturel

3 supports ont été utilisés, (*Hermitage, La Trinité et La Découverte*), le premier dans le cadre d'une thèse [Garde 97] associée à la validation de *CODYRUN*, et les deux derniers liés à un contrat de recherche.

Le premier support (tirant son nom du village où est située la maison) est de configuration simple, (pas de masques lointains), avec peu de pièces, représentatif du mode de construction dans la zone littorale en matière de maison traditionnelle. La maison est une habitation individuelle type. Les parois opaques sont en parpaing (blocs de béton creux) avec un double enduit ciment et la toiture un complexe tôle/lame d'air/contreplaqué. Les résultats associés à ce travail (fin 1996- début 1997) ont été publiés sous forme de communications [Garde 97c] et ont plus largement débouché sur

- la nécessité d'instrumenter les flux radiatifs de grande longueur d'onde. La méthodologie de validation faisant appel à des techniques de traitement de signal et à l'analyse de sensibilité non paramétrique nous a amené à identifier ces flux comme étant principalement responsables des écarts mesure/modèles .
- des modifications dans *CODYRUN*, les surfaces de parois étant initialement approchées au mètre près.

- La conviction de la nécessité du développement de méthodes spécifiques expérimentales d'étude de toitures composites complexes, la présence de la lame d'air dans le comble nous ayant posé des problèmes de modélisation en raison des couplages radiatifs et convectifs. Les supports *ISOTEST* (voir paragraphe suivant) s'inscrivent dans cette perspective.

Les deux derniers supports (*La Trinité* et *La Découverte*, du nom des opérations immobilières auxquelles les logements instrumentés appartiennent) tirent leur existence d'un contrat (Etude expérimentale financée par le *Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports*, cf Annexe D, responsabilité de contrats) s'étalant sur une période de deux ans. A la suite du label ECODOM, une étude de validation des prescriptions du label sur deux opérations immobilières nous a été confiée. Il s'agissait, sur une même opération, de l'instrumentation comparative des performances de logements T3/4 et T4/5, ECODOM et non ECODOM. L'objectif était alors, par rapport au contractant, d'instrumenter de manière simplifiée, un nombre important de logements pour opérer un éventuel retour sur les prescriptions du label (épaisseurs d'isolation, porosité des façades, ...). Cette instrumentation simplifiée (enregistrement des sollicitations météorologiques et dans certaines pièces des températures sèches d'air ainsi que les humidités relatives) avait la particularité d'être en partie réalisée en environnement habité, c'est à dire en présence des usagers des appartements. Dans cet objectif, nous avons mis en œuvre des capteurs de petite dimension autonomes (dits boîtes blanches), et de précision assez modeste. Pour l'autre partie des logements non occupés, des instrumentations détaillées (capteurs du type de ceux de la cellule LGI) ont été utilisées avec différents scénarii (stratégies de gestion des ouvertures intérieures ou extérieures, occultation partielle des vitrages, modulation de la taille des ouvertures aérauliques, instrumentation des couplages radiatifs de courte longueur d'onde entre les pièces, ...) dans l'optique d'une utilisation en recherche des données correspondantes. Un exemple en est la deuxième partie de la publication [Boyer 99, en annexe] (qui traite de l'aspect aéraulique) tirant parti d'une séquence spécifiquement instrumentée du site *de La Trinité* pour donner des éléments de validation du modèle intégré à *CODYRUN*. En dehors de ce cas pour cet appartement sur une période d'une semaine, le dépouillement de ces données n'a été effectué que vis à vis des aspects contractuels.

### 3.1.3 Les perspectives liées au nouveaux supports

#### 3.1.3.1 Les cellules ISOTEST

La principale caractéristique commune aux IMR (Isolants Minces Réfléchissants) est de disposer sur leurs faces inférieures et supérieures d'une couche de matériau réfléchissant, généralement de l'aluminium. Ces deux faces sont de plus séparés par un matériau faiblement conducteur, du papier Kraft, du polypropylène ou des films de plastique. Contrairement aux isolants classiques, ils s'étendent sur une épaisseur limitée, ce qui leur confère un avantage comparatif important. Cependant, les performances annoncées par les constructeurs et le manque de caractérisation thermique fine de ces matériaux par des organismes certifiés contribue à amplifier la situation ambiguë qui règne autour d'eux, concernant notamment leur utilisation au niveau national mais aussi dans les DOM (dans le cas d'ECODOM en particulier). C'est ainsi qu'au sein de l'équipe un premier rapport de recherche financé par l'ADEME [Garde 94], visait à déterminer les performances thermiques d'un système de toiture bardeau/sisalation. Cette étude, comprenant des mesures en environnement naturel et des simulations à l'aide du logiciel *CODYRUN*, conclut à la bonne protection solaire des IMR, en particulier sous des couvertures fortement rayonnantes telles que la tôle.

Dans le cadre de la mise en place d'une réglementation spécifique aux DOM que préfigure le label ECODOM, il nous est apparu nécessaire de mettre en œuvre les moyens d'une caractérisation expérimentale fiable. A cet effet, un ensemble de plusieurs bâtis spécifiques modulaires a été conçu pour instrumenter et comparer simultanément différents complexes, permettant en particulier la ventilation des combles.

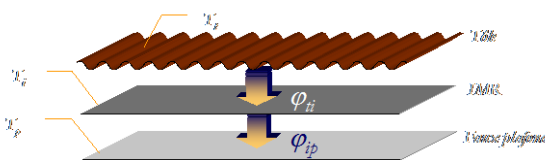


Figure 12 : Schéma d'un complexe de toiture



Figure 13 : Vue de la cellule ISOTEST



L'instrumentation a été conduite et centrée sur la mesure des flux traversant la toiture. Les premiers résultats des confrontations avec un modèle dédié (MATLAB) confirment la difficulté de modélisation de ce type de composant. En particulier, deux points spécifiques ont été identifiés :

- La nécessité impérative d'une prise en compte non linéarisée des échanges radiatifs dans le complexe.
- L'influence prépondérante de la ventilation pour ce type de toiture.

Dans l'optique de l'intégration de ce type de composants dans des applications telles que *CODYRUN* ou *TRNSYS*, le premier point pose le problème de la perte de linéarité des échanges radiatifs, hypothèse très répandue dans notre domaine. Le second nous ramène à celui des échanges aérauliques pour lesquels mon expérience ([Boyer 99] en annexe E) en la matière laisse présager de difficultés importantes. Dans cette optique, une modélisation du type réseau de neurones nous paraît prometteuse et est alors à relier à la modélisation hybride que nous souhaitons développer.

### **3.1.3.2 STA-TRON**

Actuellement en cours de bouclage financier, l'enceinte climatique d'étude de STA (Système de Traitement d'Air) a pour but d'étudier le comportement de split-système en régime dynamique et permanent dans différentes conditions de fonctionnement. Le dispositif d'étude de STA sera constitué de deux enceintes adiabatiques accolées (voir figure suivante). L'enceinte d'évaporation contiendra l'unité intérieure du STA constitué essentiellement de l'évaporateur, et l'enceinte de condensation contiendra l'unité extérieure avec le compresseur et le condenseur. Les conditions climatiques des deux enceintes seront contrôlées par des dispositifs de réchauffage, de refroidissement et d'humidification. L'instrumentation permettra d'établir des bilans précis de chaque enceinte et de suivre l'évolution des grandeurs caractéristiques du système de traitement d'air.

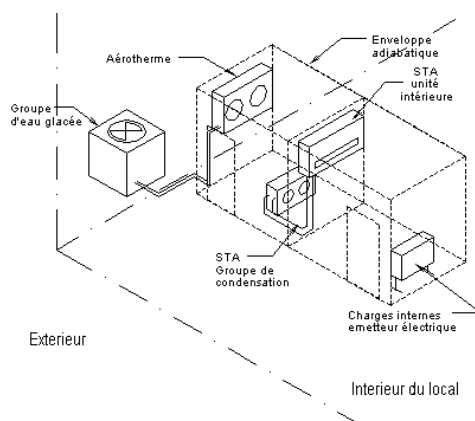


Figure 14 : Schéma de principe de l'installation

Compte tenu des travaux expérimentaux réalisés sur la cellule LGI, l'élaboration d'une enceinte climatique permettra d'approfondir nos recherches dans l'évaluation de la consommation énergétique des bâtiments. Dans ce contexte, les objectifs de l'enceinte climatique sont les suivants:

- Evaluation des performances en régime nominal et permanent : puissance frigorifique, puissance absorbée, efficacité
- Etude des régimes de fonctionnement permanent et dynamique
- Amélioration des modèles détaillés de split-system de niveau 2
- Elaboration de nouveaux modèles à base de réseaux de neurones
- Etude de la régulation et essai de nouvelles stratégies de commande

### 3.1.4 Les capteurs et l'instrumentation associée

En tant que responsable de l'équipe, mon rôle dans cette partie a été avant tout de faire des choix vis à vis des grands champs auxquels notre activité est liée : métrologie solaire, thermique des matériaux, aéraulique de bâtiments multizones, ..... C'est ainsi par exemple que compte tenu des ressources financières et humaines de l'équipe, cette dernière instrumentation à l'aide de gaz traceurs à partie a été reportée dans le temps.

Il s'agit aussi d'articuler les thématiques émergentes (cf les chapitres suivants), avec les supports existants et bien sur la partie modélisation associée. Un exemple simple est celui du maillage thermique de la dalle lors de la nouvelle installation de la cellule LGI en

prévision du développement de capteurs logiciels associés au couplage du bâtiment avec le sol. Un autre exemple est celui, dans la cadre de contrats industriels, la mobilisation des moyens (humains et techniques) sur des séquences particulières pour valoriser certains aspects.

Compte tenu en particulier de ma formation d'origine et de mon expérience antérieure à l'université, j'assure aussi une participation plus technique dans la spécification des capteurs, matériels et logiciels associés. Au rang des capteurs acquis pour nos expérimentations, se trouvent pyrgéomètre, sondes IR, flux-mètres, anémomètres, .... En perspective, un automate programmable (pour la commande des systèmes des climatisation) sera mis en œuvre pour le *STA-TRON* (en particulier pour les mesures en régime transitoire) et à plus lointaine échéance pour l'utilisation de lois de commandes performantes (cf. chapitre III)

### 3.2 La méthodologie

Cette partie détaille nos travaux dans le domaine de l'application des techniques de traitement de signal au problème de la validation. En terme de méthodologie, une partie relative à l'étape d'analyse de sensibilité fait l'objet d'un chapitre à part. (cf chap II, *Analyse de sensibilité et d'incertitude en thermique du bâtiment*)

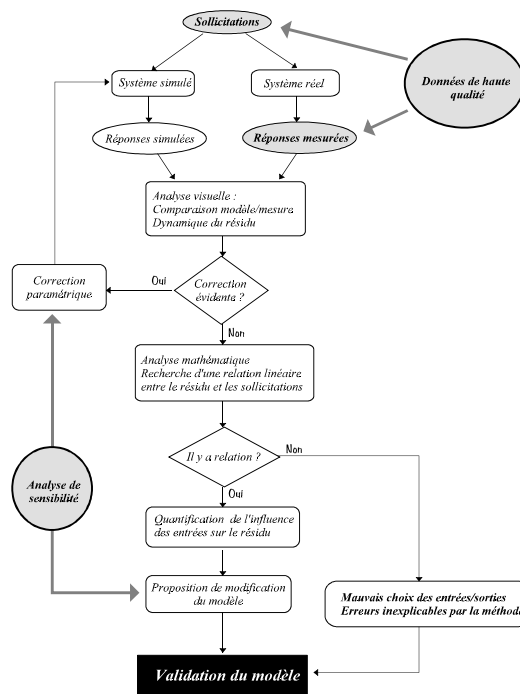


Figure 15 : Synoptique de la méthodologie de validation

### 3.2.1 Analyse spectrale du résidu

L'analyse visuelle des résultats qui consiste à tracer l'évolution, en fonction du temps, des différentes températures issues de la mesure et de la simulation est nécessaire car elle permet de savoir rapidement si le modèle décrit correctement la réalité. Cependant, elle ne permet pas toujours de déterminer les entrées qui sont à l'origine de l'erreur de modélisation. Dans cette optique, des travaux antérieurs ont montré l'intérêt des outils d'analyse spectrale. En particulier, Ramdani [Ramdani 94] propose une méthodologie faisant appel à ces outils et qui se décompose en 3 parties :

- Une vérification de la validité du modèle;
- La quantification de la part d'erreur présente dans la modélisation;
- La détermination de l'origine de l'erreur.

L'analyse du résidu (écart mesure / modèle) permet de vérifier la validité du modèle. En effet, si celui-ci décrit correctement la réalité, le résidu ne contient pas d'informations. Le spectre de puissance (DSP) d'un signal, étant la décomposition de sa variance en fonction de la fréquence, met en évidence la composante périodique d'un signal. Un bruit de mesure étant le plus souvent assimilé à un signal aléatoire, si le spectre de puissance du résidu indique, par exemple, que celui-ci est périodique, alors il ne pourra pas être considéré comme du bruit. De même, s'il n'est pas significativement corrélé aux entrées, il est raisonnable de penser a priori que le modèle décrit correctement la réalité. Les auteurs proposent le test de cohérence de Fisher pour vérifier que la corrélation entre deux signaux est significativement non nulle. Afin de quantifier la part d'erreur de modélisation, les mêmes auteurs décomposent la variance du résidu en la somme de différentes variances expliquées par les excitations du bâtiment. Dans le cas où ces dernières sont fortement corrélées, on ne peut quantifier réellement la part uniquement imputable à la première. Une fois repérées les entrées responsables de l'écart mesure et simulation, l'étape suivante consiste à déterminer les raisons de l'écart observé.

La comparaison des phases et des gains des fonctions de transfert identifiées sur la mesure et la simulation peut renseigner sur l'origine de l'erreur, à savoir s'il s'agit d'un problème d'inertie ou d'un flux d'énergie mésestimé. Cependant, la connaissance de la modélisation et de l'expérimentation du bâtiment est primordiale pour déterminer les causes réelles des écarts observés. En effet, l'origine de ces écarts peut aussi bien venir du modèle du bâtiment que de la mesure.

Pour faciliter cette analyse, une application interactive a été développée au sein de l'équipe permettant, au départ de fichiers de sollicitations, de mesure et de calcul, le tracé des courbes d'évolution temporelles, de la DSP des entrées, des cohérences entre le résidu et les entrées, ainsi que la décomposition en bandes de fréquences (paramétrable) de la variance du résidu [Mara 98].

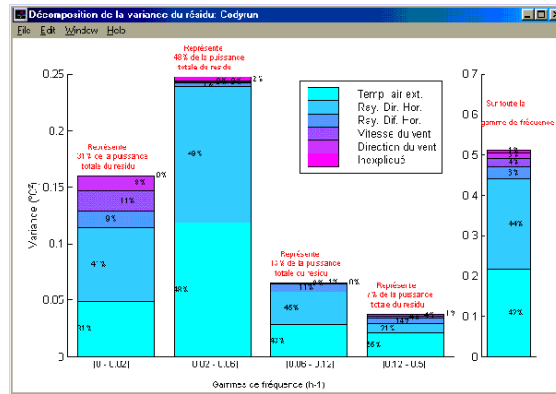


Figure 16 : Exemple de décomposition de la variance sur 4 gammes de fréquences

Nous utiliserons plus en aval les sorties de cette application lors de la comparaison avec les cellules ETNA.

### 3.2.2 Les apports de l'analyse temps fréquence

Cette partie a été initiée à la suite de la précédente dans le cadre d'un stage de DEA [Abelard 99]. L'application des outils précédents a montré certaines limites dans le cas où les sollicitations étaient corrélées entre elles, ce qui est courant dans notre domaine. Nous montrons alors que l'analyse temps-fréquence apporte des éléments complémentaires dans le cadre de la validation. Ce travail a été mené en deux phases :

- l'une strictement numérique, visait à analyser le résidu issu de deux résultats de simulations qui ne différaient que d'un paramètre caractéristique (surface de vitrage par ex.) du bâtiment utilisé pour cette étude (la cellule expérimentale *LGI*).
- La seconde visait à utiliser l'analyse sur un résidu réel, i.e. constitué de l'écart entre une série de mesure et des résultats ;

Dans chaque cas, la démarche est identique, visant à la recherche de la signature d'une entrée par comparaison des tâches des scalogrammes des entrées et du résidu

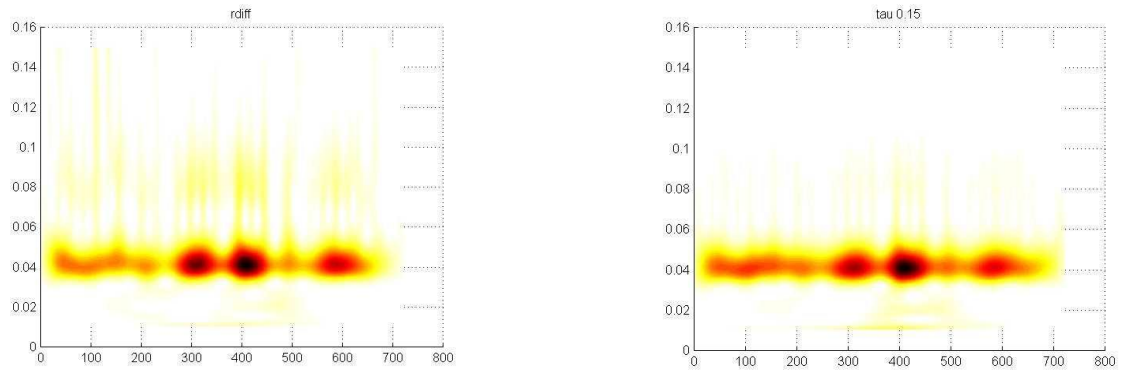


Figure 17 : Scalogrammes de l'écart et du rayonnement diffus

Sur le cas précédent issu de la première phase, le paramètre différent entre les deux simulations est le coefficient de transmission du rayonnement direct à incidence nulle du vitrage. Les scalogrammes montrent bien que, compte tenu de l'exposition Sud du seul vitrage et de la période (Avril), le rayonnement diffus et l'écart sont fortement liés.

Dans le cas de l'utilisation pour la validation, (cellule *LGI*), nous avons observé que des taches du résidu pouvaient ne pas être présentes au niveau des entrées. Ainsi, pour la cellule *LGI*, des tâches apparaissaient en TBF (Très Basse Fréquence), pour une séquence permettant au rayonnement direct de pénétrer la cellule (Janvier). Différentes simulations nous ont mené à l'interprétation de ces tâches par le stockage d'énergie (rayonnement absorbé par le plancher) lié à la capacité surfacique du plancher de la cellule. Il est à noter que l'analyse spectrale du résidu, dans ce cas, conduit à le corrélérer avec la seule excitation possédant une composante TBF, à savoir la vitesse du vent.

### 3.3 Confrontations extérieures

Il existe une dynamique très forte de coopération entre les équipes de recherche, en Europe et aux Etats Unis, que ce soit pour des codes de référence tels que ESP-r [Clarke 85] ou SERI-RES [Martin 93], ou des codes plus récents tels que CLIM2000 [Rongère 90] ou APACHE [Delille 96], [Bloomfield 95]. Cette volonté est née d'une part de la spécialisation des équipes dans une des étapes de la validation et d'autre part du caractère plus impartial des collaborations entre équipes pour la validation (validation en aveugle, ...).

A côté des cas locaux (i.e. avec nos supports ou encore avec d'autre logiciels mis en œuvre localement, *CODYBA* et *TRNSYS*, cf. [Boyer 93] et [Lucas 98]), nous présentons deux cas

illustratifs de deux étapes de la démarche de validation. Au passage, il est à noter que pour être à même de mener à bien des confrontations avec d'autres codes de calcul (sans parler de performances), il est nécessaire de disposer d'un code complet, c'est à dire intégrant beaucoup d'aspects : citons sans être exhaustif les doubles vitrages, les masques, les systèmes de traitement d'air avec prise en compte de la régulation (bande morte), la ventilation mécanique, le multizonage, la possibilité d'imposer une température pour une zone, les parois sur vide sanitaire, la gestion des bibliothèques de matériaux, ... De plus, pour cette fois identifier les sources de problèmes, beaucoup de variables annexes aux principales (températures et énergies) doivent être accessibles, tels que les flux incidents dans chaque zone, les flux absorbés par chaque paroi, les coefficients de transmission des vitrages, ....

Signalons que d'autres confrontations sont en cours dans le cas de propositions extérieures (Afrique du Sud, Brésil, Pakistan, ...).

### 3.3.1 La procédure BESTEST :

Afin de vérifier la bonne implémentation numérique des modèles, nous avons comparé les résultats de simulation de notre logiciel à ceux issus d'autres codes de calcul [Soubdhan 99]. La référence en matière de comparaison inter-logiciel est la procédure BESTEST [Judkoff 83], [Judkoff 95]. Cette procédure a été développée dans le cadre de l'annexe 21 Task 12 du programme Solar Heating and Cooling (SHC) par l'International Energy Agency (IEA). Cette démarche permet de tester les logiciels de simulation du comportement thermique du bâtiment en simulant différents bâtiments dont la complexité croît progressivement et en comparant les résultats obtenus avec ceux d'autres codes de simulation (ESP, DOE2, SERI-RES, CLIM2000, TRNSYS, ...).

La procédure consiste en une série de bâtiments minutieusement modélisés, allant progressivement du cas le plus dépouillé au cas le plus réaliste. Les résultats des simulations numériques, tels que les énergies consommées sur l'année, les températures annuelles minimales et maximales, les pics de puissance appelée et quelques données horaires, obtenus à partir des programmes de références, constituent un intervalle de tolérance dans lequel le logiciel à tester doit se trouver. Cette procédure a été développée à l'aide d'un certain nombre de programmes de simulation numérique en thermique du bâtiment, considérés comme étant l'état de l'art en la matière aux Etats Unis et en Europe. Les pays qui pendant cinq ans ont participé à cette recherche ainsi que leurs programmes respectifs utilisés sont :

- Building Research Establishment (Royaume Uni, **SERIRES 1.2**)
- De Monfort University (Royaume Uni, **ESP-RV8**)
- Electricité de France (France, **CLIM2000**)
- Lund Institute of Technologie (Suède, **DEROB-LTH**)
- National Renewable Energy Laboratory (Etats unis, **BLAST 3.0, DOE-2.1D, SERIRES/SUNCODE 5.7**)
- Politecnico Torino (Italie, **BLAST 3.0**)
- Tampere University (Finlande, **TASE**)
- University of Sevilla (Espagne, **S3PAS**)
- Vrije Univeriteit (Belgique, **TRNSYS 13.1**)

L'expérience collective du groupe a démontré que lorsqu'un programme montrait des écarts majeurs avec les programmes dits de référence, la raison sous-jacente était un bogue ou un algorithme défaillant. Après correction de certaines parties de *CODYRUN*, un exemple de résultat issu de cette confrontation est le suivant :

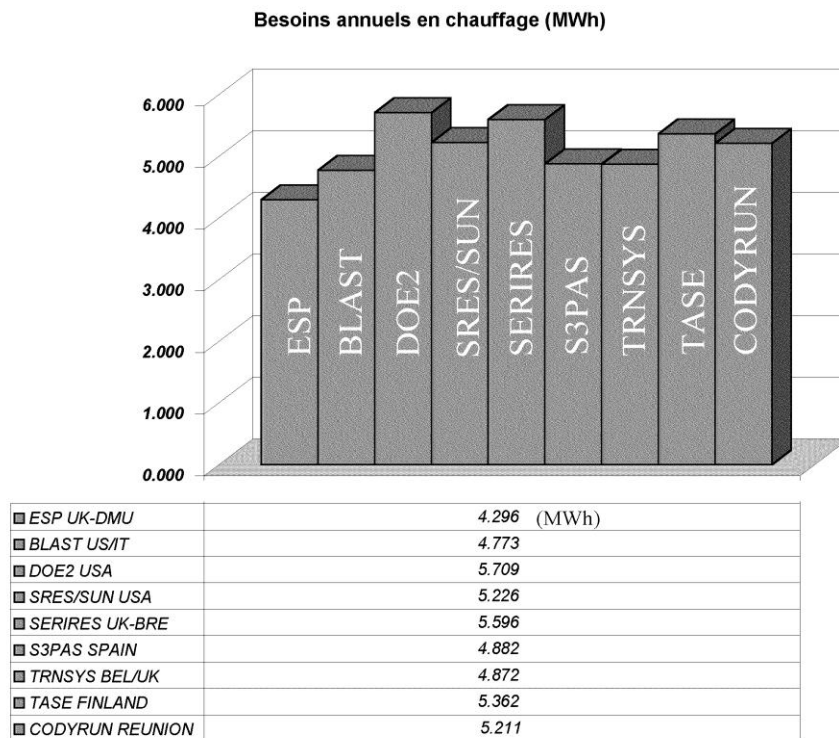


Figure 18 : Exemple de résultat *BESTEST*

Il concerne les besoins d'énergie en chauffage sur une année, pour lesquels les résultats de notre application semblent convenables.

La procédure prévoit plus d'une centaine de simulations et sur les cas traités, *CODYRUN* affichait des résultats compatibles avec la majorité des programmes de référence, excepté pour quelques uns. Il nous a été ainsi permis de mettre en évidence certaines erreurs, par exemple dans l'algorithme de calcul du coefficient de transmission du rayonnement diffus



associé à un double vitrage et un autre dans la répartition du rayonnement incident par les vitrages à l'intérieur de l'enveloppe. De même que dans les codes de référence, deux remarques sont à retenir : la majorité des erreurs provient d'une mauvaise implémentation du code et toute l'efficacité de la procédure BESTEST est à nouveau vérifiée, ces erreurs appartenant à des modules qui sont utilisés depuis des années.

Un cas posant problème a été celui testant l'influence de l'absorptivité intérieure des parois vis à vis du rayonnement de courte longueur d'onde. Dans le cas d'absorptivités très faibles (0.05), les puissances calculées par *CODYRUN* étaient clairement mises en défaut, sans que la correction de l'algorithme en question ait été immédiate. Nous verrons au paragraphe suivant que la confrontation avec des résultats de mesure et l'application des outils de traitement de signal nous permettra de mieux comprendre ce problème et de corriger l'algorithme défaillant.

### 3.3.2 Confrontations avec EDF-DER / Cellules ETNA

La Direction des Etudes et Recherches (D.E.R.) d'EDF dispose depuis 1990 d'un laboratoire d'essais thermiques et aérauliques [Girault 95]. Ce laboratoire se compose de deux cellules jumelles du point de vue thermique, accolées entre elles et construites selon la réglementation thermique de 1989. Ces cellules sont localisées sur le site des Renardières dans la banlieue sud-est de Paris. Elles portent le nom de cellules ETNA, *pour Essais Thermiques en climat Naturel et Artificiel*. En effet, la modularité d'une des gardes thermiques l'entourant lui confère l'aptitude aux essais en climat naturel ou artificiel.

Les objectifs concernant ces cellules sont doubles :

- réaliser des tests de composants, soit thermiques, soit aérauliques, et profiter de la gémellité des cellules pour réaliser des comparaisons en temps réel (climat naturel)
- contribuer à la validation expérimentale de modèles de thermique du bâtiment et de *CLIM2000* notamment.

La description détaillée de cette cellule est disponible [Girault 95]. Pour mener à bien cette confrontation, j'ai ajouté à la liste des composants intégrés par *CODYRUN* les charges internes à évolution spécifique. Rappelons que dans ce cas, l'évolution d'une charge interne

(convecteur) est décrite au moyen d'un fichier. En effet, l'injection de la puissance est commandée par une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA).

Les résultats de la confrontation sont déclinés en deux étapes, l'une issue de la modélisation initiale, l'autre après amélioration d'un algorithme lié à la répartition des flux intérieurs de courte longueur d'onde pénétrant la pièce par le vitrage. Ce modèle de répartition a été précédemment mis en défaut par la procédure BESTEST.

### 3.3.2.1 Analyse visuelle

Sur la figure présentée ci dessous, les résultats du modèle sont comparés aux mesures, ce sur une période de 21 jours (25/02/95 au 19/03/95). Pendant les deux premiers jours, le bâtiment est en évolution libre. Nous allons pour la suite de cette confrontation adopter la démarche suivie par EDF, en considérant le résidu en température sèche d'air et de surface du plancher [Delille 96]. Les six premiers jours sont exclus de la comparaison, étant considérés comme faisant partie de la phase de mise en régime du bâtiment.

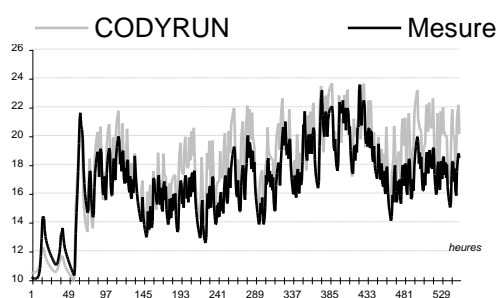


Figure 19 : Températures sèches d'air

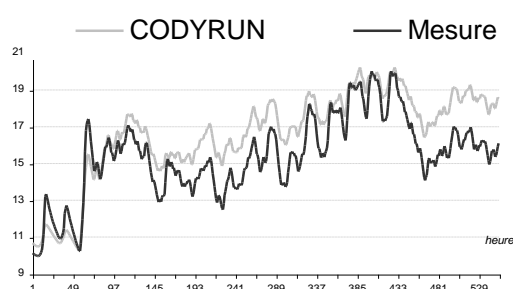


Figure 20 : Températures de surface de plancher

Le tableau suivant résume les résultats de cette première analyse et donne une première indication sur l'origine de l'erreur de modélisation, faisant manifestement intervenir le plancher, sans toutefois indiquer le phénomène concerné.

Résidu en ...	Moyenne (°C)	Ecart type (°C)
... température sèche d'air	-0.78	0.95
... température de surface du plancher	-1.59	0.71

Le résidu se définissant comme l'écart mesure - modèle, *CODYRUN* affiche ainsi une sous estimation systématique des températures ainsi qu'un écart type important par rapport à d'autres cas de validation.

### 3.3.2.2 Analyse mathématique :

Les entrées considérées sont la puissance de chauffage, les flux solaires direct et diffus horizontaux, la température extérieure et la vitesse du vent. Le tracé de leur DSP montre que la puissance de chauffage excite de manière importante le bâtiment dans une large gamme de fréquences. Les puissances des flux solaires sont confinées autour de la première et seconde harmoniques du jour ( $1 \text{ jour}^{-1} = 0,042 \text{ h}^{-1}$ ), alors que celle de la température sèche d'air extérieur est distribuée sur des fréquences lentes (proches du régime permanent) et autour de la première harmonique. L'analyse des cohérences montre une inter-corrélation importante du résidu avec le rayonnement direct autour de la journée et avec la puissance convectée en haute fréquence.

La décomposition de la variance du résidu en température résultante est la suivante

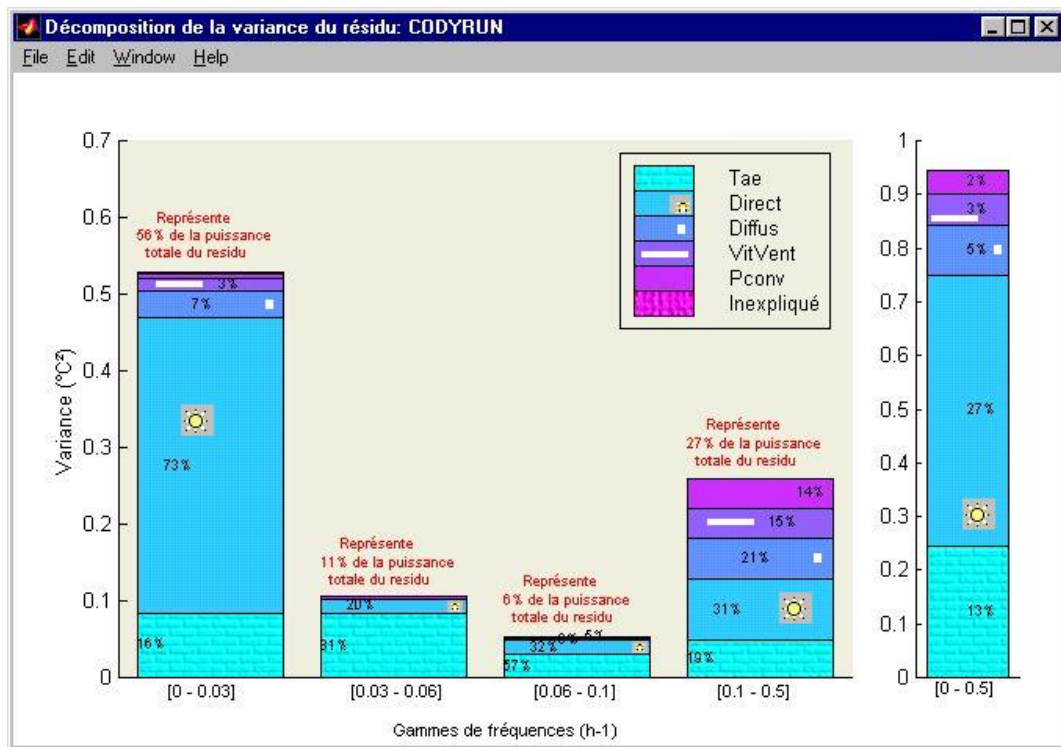


Figure 21: Décomposition de la variance du résidu en température résultante

En plus du fait qu'une part très faible de l'erreur n'est pas expliquée par les entrées (en très basse fréquence), deux lobes sont prépondérants, l'un en très basse fréquence, l'autre en

haute fréquence, expliquant à eux deux plus de 80 % de la variance du résidu. Par ailleurs, lors de l'évocation des apports à la validation de l'analyse temps fréquence, nous avons justement évoqué l'apparition de taches en très basse fréquence dans le scalogramme lié au rayonnement direct incident sur le plancher.

Ces premiers résultats ont été obtenus avant que l'application de la procédure BESTEST ne détecte un problème dans l'algorithme de répartition des flux de courte longueur d'onde incidents par les vitrages. Après correction de l'erreur qui a été découverte par confrontation avec un programme de modélisation spécifique de la cellule (LGILAB), de nouvelles simulations ont été réalisées, suivies de la décomposition de la variance du nouveau résidu. La courbe d'évolution du résidu est alors tracée :

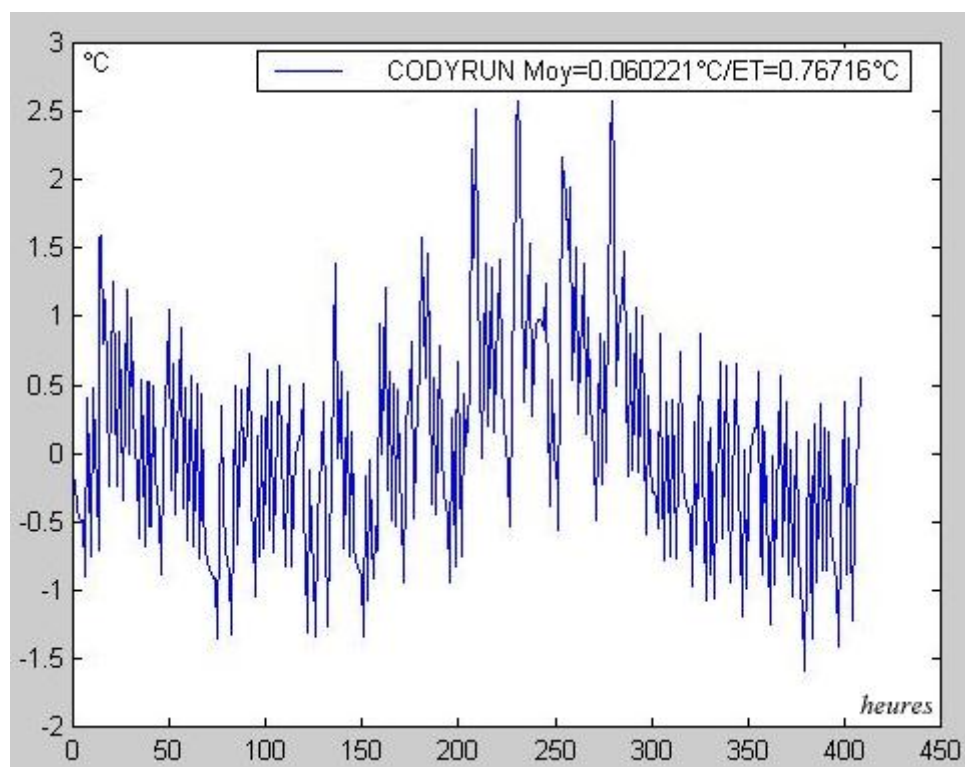


Figure 22 : Evolution du résidu après correction

Résidu en ...	Moyenne (°C)	Ecart type (°C)
... température résultante	0.06	0.77

La moyenne du résidu est nettement améliorée. En ce qui concerne la variance, sa décomposition selon les mêmes gamme de fréquences que précédemment est la suivante :

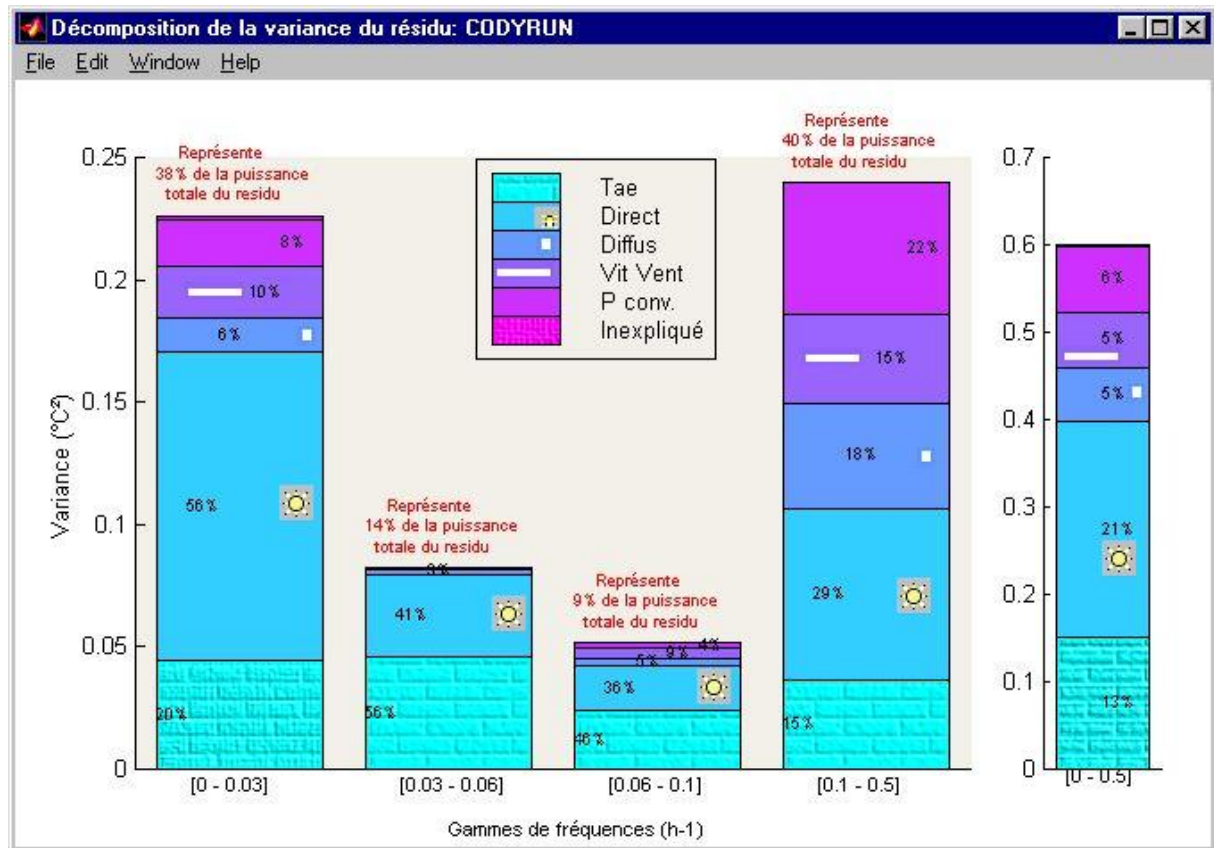


Figure 23 : Décomposition de la variance du résidu en température résultante.

Une réduction importante de la variance du résidu est obtenue, en particulier en TBF. Cependant, la part relative toujours importante du direct est à noter dans la décomposition de la variance dans cette gamme de fréquences. Des améliorations de modèles sont donc encore possibles à ce niveau. Nous rejoignons ainsi les conclusions d'EDF pour la validation de CLIM2000 en utilisant le même support, code pour lequel une réduction sensible de la variance n'a été atteinte dans ce cas qu'en intégrant des modèles détaillés de répartition du rayonnement de courte longueur d'onde incident (tâche solaire en particulier). Vis à vis des hautes fréquences, il s'agit de la bande expliquant désormais la plus grande part de la variance de l'erreur.

## 4 UNE APPLICATION A GRANDE ECHELLE : LE LABEL ECODOM

Le label ECODOM [Garde 98, en annexe] a pour objet de faciliter la réalisation de logements confortables en ventilation naturelle, c'est à dire en évitant le recours à un système de refroidissement de l'air ambiant par une machine frigorifique consommant de l'énergie électrique. Ce label a des objectifs sociaux et économiques car il conduit à la fois à une amélioration du confort thermique et à la réduction des dépenses énergétiques des logements concernés. Le but d'ECODOM est davantage de proposer des solutions techniques simples à un coût acceptable plutôt que de rechercher le bâtiment bioclimatique idéal, par ailleurs financièrement et économiquement irréalisable. De plus, la simplicité des solutions techniques proposées permet un développement semblable dans des pays connaissant le même type de climat.

Sans reprendre la méthodologie suivie et exposée dans la référence citée précédemment, pour les logements types (un collectif et un individuel), la figure suivante récapitule les simulations qui ont été conduites pour toutes les configurations envisagées.

Logement ind. léger				Logement ind. lourd				Logement collectif plignon				Logement collectif s/toiture				Logement collectif interniveau			
<b>Protection solaire de la toiture</b>								<b>Protection solaire des vitrages</b>											
<i>Couleur</i>	<i>Isolant</i>	Etude en température	Etude en puissance	<i>Dimensions du débord</i>	Etude en température	Etude en puissance													
foncée	0 cm	x	x	Pas de débord	x	x													
	$\alpha = 0.7$	x	x	$d/(2a+h) = 0.25$	x	x													
	10 cm	x	x	$d/(2a+h) = 0.5$	x	x													
claire	0 cm	x	x	$d/(2a+h) = 0.75$	x	x													
	$\alpha = 0.4$	x	x	$d/(2a+h) = 1.75$	x	x													
	5 cm	x	x	Lames mobiles opa	x	x													
	10 cm	x	x																
<b>Protection solaire des parois</b>								<b>Ventilation naturelle</b>											
<i>Traitement</i>	<i>Couleur</i>	Etude en température	Etude en puissance	<b>Perméabilité</b>				Etude en température											
<i>Isolation</i>				extérieure	intérieure														
0 cm		x	x	15%	15%	x													
2 cm	$\alpha = 0.4$	x	x	15%	25%	x													
4 cm	et 0.7	x	x	15%	40%	x													
<b>Protection par débord</b>								25%	15%	x									
$d/h = 0.25$		x	x	25%	25%	x													
$d/h = 0.50$	$\alpha = 0.4$	x	x	25%	40%	x													
$d/h = 0.75$	et 0.7	x	x	40%	15%	x													
$d/h = 1$		x	x	40%	25%	x													
		x	x	40%	40%	x													
<b>Cas réel</b>								<b>Option chambre climatisée</b>											
Comparaison Logement Base / Logement ECODOM								Comparaison Base/ECODOM											

Figure 24 : Récapitulatif de l'ensemble des simulations pour tous les logements types

Sur des bâtiments collectifs et individuels types, l'ensemble des simulations effectuées à l'aide de *CODYRUN* (contrat EDF-GC DOM) nous a conduit à définir des solutions techniques passives performantes pour chaque composant de l'enveloppe, ainsi qu'un ratio

minimal de perméabilité de façades pour optimiser la ventilation naturelle. Les logements qui sont construits dans le cadre d'ECODOM doivent satisfaire l'ensemble de ces solutions techniques.

Les objectifs en terme de nombre de logements sont de l'ordre de 6000 logements en trois ans. Le gain énergétique total serait alors de l'ordre de 6 MW en puissance appelée et 23 GWh électrique (5100 TEP). Les répercussions sur l'environnement seraient également importantes car 23 GWh électrique économisés représentent en première approche une réduction d'émission de 5000 T de CO<sub>2</sub>.

Un suivi expérimental des logements est effectué pour les premières opérations ECODOM, de manière à valider expérimentalement l'impact des solutions sur le confort des occupants (Voir opérations *La Trinité* et *La Découverte*, évoquées au paragraphe II, description des supports). Ce suivi est d'autant plus important que la mise en place du label ECODOM préfigure l'application d'une réglementation thermique dans les départements d'Outre-mer français d'ici l'an 2000.

A l'usage (Expertises support technique ECODOM réalisées par notre équipe pour le compte d'EDF Réunion), les prescriptions du label se sont avérées difficiles d'une part à concilier simultanément et d'autre part parfois strictement incompatibles avec d'autres aspects (acoustique en particulier). Dans une vision moins maximaliste, une démarche est en cours visant à la mise en œuvre d'un label à points. En attribuant un certain nombre de points en fonction du respect de chaque prescription élémentaire, la performance du bâtiment s'apprécierait globalement à l'aide d'une note permettant une compensation entre prescriptions. Des discussions sont en cours en vue de la signature d'un autre contrat EDF-GC DOM / LGI pour la réalisation de simulations avec *CODYRUN* pour définir la pondération de chacune des prescriptions.

# *Analyse de sensibilité et d'incertitude en thermique du bâtiment*

Les objectifs de nos travaux dans ce domaine sont doubles et rappellent la dualité des aspects d'aide à la conception et de recherche qui ont constamment sous-tendu notre activité. Dans le cas de l'utilisation d'outils d'aide à la conception dans un bureau d'études, les incertitudes sur les paramètres (par exemple sur les propriétés thermo-physiques des matériaux) sont importantes et il convient de s'intéresser à leur incidence sur les sorties. Dans cette même optique, un second volet a trait à l'optimisation technique du fonctionnement thermique d'un bâtiment. L'analyse de sensibilité réalisée dans cet objectif vise à agir sur le paramètre influençant le plus une fonction objectif déterminée (énergie consommée, température moyenne, ...), dans un but d'optimisation technico-économique. Des exemples de ces paramètres peuvent être l'épaisseur d'isolant, la surface des vitrages ou des ouvertures. Dans [Rao 93], il est montré que l'utilisation de l'analyse de sensibilité appliquée à un modèle aérodynamique nodal permet de réduire considérablement le nombre de simulations à réaliser pour atteindre un objectif donné. Cette partie d'analyse de sensibilité ou d'incertitude orientée aide à la conception n'est que partiellement intégrée à nos travaux, aussi ce chapitre ne traite que de l'analyse de sensibilité et d'incertitude considérées comme faisant partie de la démarche de validation de modèles [Lomas 92].

En terme d'illustrations, nous nous sommes appuyés sur le cas de la cellule LGI. Nous disposons par ailleurs d'un autre code (LGIMAT) dédié à la modélisation de ce support et permettant surtout de mener des analyses d'incertitude et de sensibilité.





<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION :</b> .....	<b>66</b>
<b>2.</b>	<b>REVUE DES METHODES ET DE LEUR APPLICATION EN THERMIQUE DES BATIMENTS</b> .....	<b>68</b>
2.1.	METHODES PROBABILISTES D'ANALYSE D'INCERTITUDE .....	68
2.2.	METHODES DETERMINISTES D'ANALYSE DE SENSIBILITE .....	69
2.2.1.	<i>Démarche directe</i> .....	69
2.2.2.	<i>Démarche approchée :</i> .....	70
2.2.3.	<i>Méthodes stochastiques</i> .....	70
2.2.4.	<i>Autres méthodes</i> .....	71
2.2.5.	<i>Synthèse :</i> .....	71
<b>3.</b>	<b>INTEGRATION DANS L'ENVIRONNEMENT CODYRUN :</b> .....	<b>72</b>
3.1.	ANALYSE D'INCERTITUDE :.....	72
3.1.1.	<i>Organisation des traitements</i> .....	72
3.1.2.	<i>Le principe de l'analyse MCA (Monte-Carlo Analysis)</i> .....	73
3.1.3.	<i>L'intégration de l'analyse d'incertitude à CODYRUN :</i> .....	74
3.2.	ANALYSE DE SENSIBILITE .....	76
<b>4.</b>	<b>UNE CONTRIBUTION METHODOLOGIQUE A L'ANALYSE DE SENSIBILITE :</b> .....	<b>76</b>
4.1.	LA METHODE PROPOSEE :.....	76
4.2.	LE LIEN AVEC L'ANALYSE DE REGRESSION .....	78
4.3.	UNE APPLICATION AVEC LA CELLULE EXPERIMENTALE .....	81
<b>5.</b>	<b>VARIATIONS AUTOUR DE LA CELLULE LGI :</b> .....	<b>83</b>
5.1.	SCREENING ET ANALYSE D'INCERTITUDE MCA: .....	83
5.2.	SCREENING, DSA ET ANALYSE D'INCERTITUDE MCA : .....	85
<b>6.</b>	<b>QUELQUES PERSPECTIVES EN LIAISON AVEC NOS AUTRES TRAVAUX :</b> .....	<b>86</b>

## 1. INTRODUCTION :

Historiquement, le rôle joué par les paramètres dans la validation de modèles numériques apparaît dans les années 70, initialement motivée par la préoccupation de sûreté des réacteurs de centrales nucléaires. L'Estimation Probabiliste du Risque a depuis connu des applications dans beaucoup d'autres disciplines telles que l'économie et les techniques de l'ingénieur. Il importe de comprendre que l'analyse de sensibilité regroupe souvent un ensemble d'études concernant la relation paramètres / sorties qui sont :

- Le screening qui consiste à déterminer dans un modèle à  $n$  paramètres, les  $k < n$  plus influents. En général, l'information est qualitative, dans ce sens qu'il ne s'agit pas de chiffrer leur influence sur la sortie. Les effets d'interaction (non-linéarité) entre les paramètres ne sont pas pris en compte. Cette étude est indispensable pour la suite surtout en présence d'un nombre important de paramètres.
- L'analyse de sensibilité proprement dite qui consiste à évaluer l'effet sur la ou les sortie(s) de chacun de paramètres, tout en tenant compte des effets non linéaires. L'intérêt est par exemple d'évaluer la part de la variance des écarts (liés à la variation des paramètres) due à chacun des paramètres considérés. Cependant, pour mener à bien ce travail, il est indispensable d'avoir un jeu de paramètres restreints, c'est la raison pour laquelle cette partie est souvent précédée d'une étape de screening.
- L'analyse d'incertitude qui consiste à déterminer un intervalle de confiance sur les résultats prédits par le modèle. Plutôt que de fournir en sortie du modèle une valeur (ou une courbe), l'analyse d'incertitude revient à fournir un ensemble de valeurs bornées (ou un faisceau) dans lequel les résultats prédits sont susceptibles d'appartenir, compte tenu de l'incertitude sur les valeurs de certains paramètres et entrées du modèle. Dans cette étude, il est aussi conseillé de considérer les paramètres issus du screening ou de l'analyse de sensibilité.

Dans notre domaine, différents laboratoires de recherche se sont intéressés à la validation des codes de calcul en thermique du bâtiment. La méthodologie globale ayant été rappelée précédemment, l'analyse des sensibilité est indissociable de la validation

expérimentale. Cette analyse consiste d'une part à étudier l'influence des paramètres sur les résultats du modèle du bâtiment étudié et ainsi de déterminer les paramètres les plus influents. Il s'agit ensuite de confronter les résultats de mesure à ceux de la simulation, tous deux affectés de leur intervalles d'incertitudes respectifs. Ainsi que souligné par [Fürbringer 92], la mesure et le modèle ne sont tous deux que des approximations de la réalité physique et la comparaison menée entre l'un et l'autre n'a pour ainsi dire de sens que si les incertitudes respectives sont connues.

Enfin, dans le cas d'un écart important des résultats, cette analyse mène à déterminer le ou les modèles et/ou les paramètres responsables de l'erreur afin d'améliorer le modèle. Dans le cas où les écarts entre la mesure et le modèle sont liés à la méconnaissance de la valeur de certains paramètres. Un algorithme d'optimisation est le plus souvent utilisé pour déterminer leur valeur.

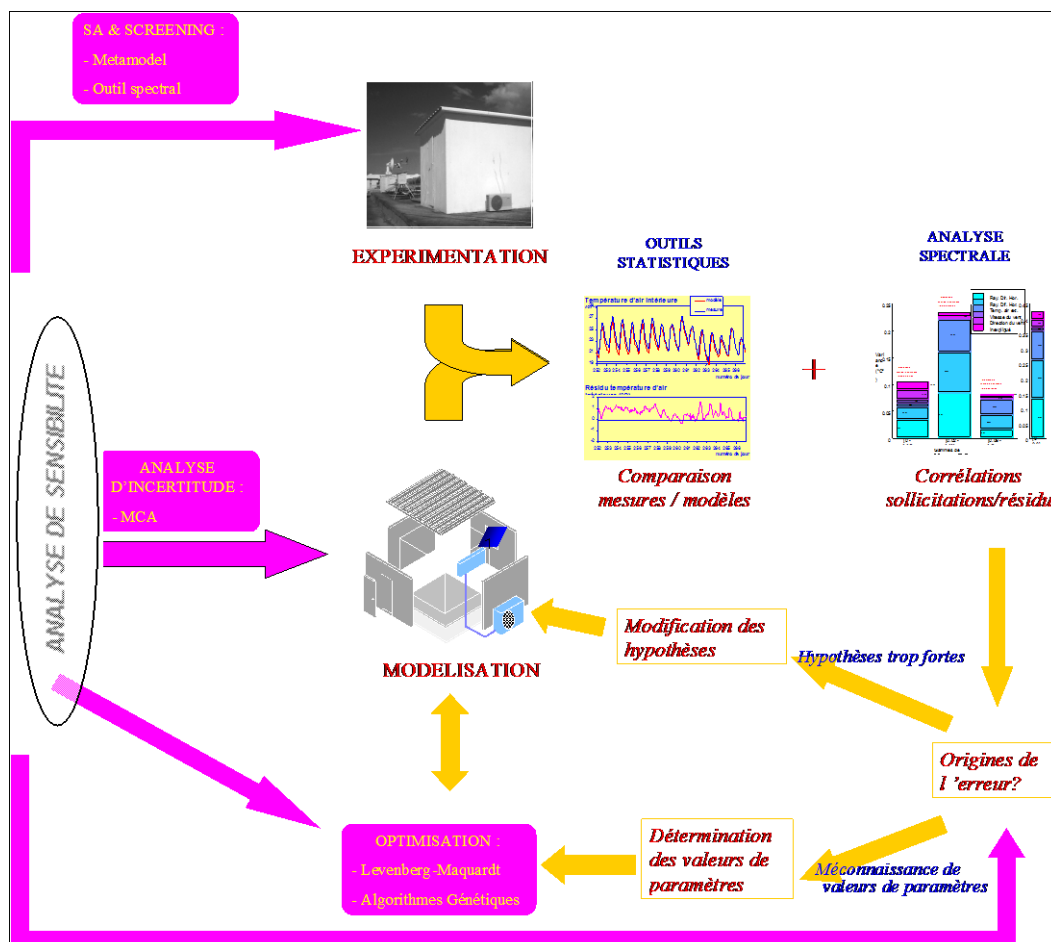


Figure 25 : Apport de l'analyse de sensibilité à la validation

## **2. REVUE DES METHODES ET DE LEUR APPLICATION EN THERMIQUE DES BATIMENTS**

Dans la démarche de validation en thermique des bâtiments (rappelée au premier chapitre), tous les auteurs s'accordent à dire que les deux dernières phases sont d'une extrême importance [Bloomfield 88], [Ramdani 94]. Les calculs de l'incertitude et des coefficients de sensibilité aux différents paramètres doit donc faire partie intégrante de la validation expérimentale. L'analyse de sensibilité et d'incertitude vise deux objectifs :

- Indiquer les paramètres ou entrées du modèle qu'il est indispensable de mesurer avec la plus grande précision (en vue de l'expérimentation).
- Déterminer la précision du résultat de simulation en donnant le moyen d'encadrer le résultat du calcul par un intervalle d'incertitude.

Différentes techniques sont actuellement utilisées : les méthodes probabilistes [Lomas 92], les méthodes déterministes [Jensen 91], les méthodes stochastiques [Lomas 92] ainsi que d'autres issues de domaines de connaissance très variés. Des articles introductifs à toutes ces techniques sont par exemple [Fürbringer 96] et [Kleijnen 97]. En thermique des bâtiments, l'importance de ces questions et les moyens à mettre en oeuvre ont conduit certaines équipes telles que le BRE à ne travailler que sur l'analyse de sensibilité paramétrique. Souvent, pour accomplir ce travail, les autres équipes de recherche font appel à leur compétence, ce qui est le cas pour EDF-DER.

### **2.1.Méthodes probabilistes d'analyse d'incertitude**

Un moyen de déterminer un intervalle d'incertitude est la méthode de Monte-Carlo. (Monte-Carlo Analysis, MCA). Celle-ci consiste à calculer numériquement la fonction de distribution du résultat lorsqu'on tient compte de toutes les incertitudes. Les paramètres du modèle sont considérés comme des variables aléatoires suivant des lois probabilistes (par exemple la loi normale centrée), puis des tirages de ces variables et des simulations sont effectuées pour les valeurs de paramètres obtenus. Durant chaque simulation, tous les paramètres gardent une valeur constante. Ainsi, l'analyse de l'ensemble des résultats permet d'obtenir la répartition du résultat, avec une erreur sur les paramètres statistiques estimés de  $\pm 10\%$ . Elle ne peut cependant mettre en évidence l'influence d'un paramètre particulier sur le résultat de la simulation L'avantage de la méthode de Monte-Carlo est sa compatibilité avec

tous les types de modélisation (paramétrique, phénoménologique, linéaire ou non). Cependant, cette technique se heurte à l'obstacle du temps calcul : le nombre de simulations qu'il est nécessaire de réaliser pour parvenir au résultat désiré (estimations des premiers moments statistiques) est typiquement de l'ordre de 100. Différentes techniques d'échantillonnage ont été mises au point pour diminuer le nombre de simulations nécessaires à l'estimation désirée, tel que l'échantillonnage LHS (Latin Hypercube Sampling), [Press 92]. Cependant, sur le cas des cellules ETNA et de la validation de CLIM2000, cette technique ne s'est pas avérée intéressante [Rahni 98].

L'autre difficulté est, en plus du choix des valeurs nominales des paramètres (difficulté inhérente à la modélisation elle-même), celle de l'incertitude à associer aux paramètres. Si pour les entrées mesurées cette information est disponible, il n'en est pas de même pour les paramètres de l'enveloppe (thermophysiques, mais aussi géométriques) et éventuellement des systèmes associés.

Enfin, des questions restent en suspens quant à l'influence de la loi de distribution choisie. Pour des mesures il est d'usage de considérer des lois normales alors que des lois uniformes sont utilisées pour des valeurs extraites de la littérature.

## **2.2.Méthodes déterministes d'analyse de sensibilité**

### **2.2.1. Démarche directe**

Les équations de sensibilité, introduites par Frank sont obtenues par différentiation des équations différentielles régissant les phénomènes physiques par rapport à leur paramètres [Frank 78]. Leur résolution directe est préconisée dans le cas où les paramètres sont peu nombreux. Un exemple dans le cas de l'aérodynamique est [Rao 93]. Une méthode dite adjointe est plus efficace, pour des modèles à grand jeu de paramètres et à variables de sortie peu importantes.

Des procédures numériques peuvent être incorporées à des codes pour différentier automatiquement les équations. Cette démarche a été adoptée dans des domaines divers tels que le stockage des déchets nucléaires, l'hydraulique, mais pas à notre connaissance en thermique des bâtiments.

### 2.2.2. Démarche approchée :

Cette méthode appelée Analyse de Sensibilité Différentielle (DSA) ou technique de perturbation est très utilisée en thermique du bâtiment car elle permet de séparer l'influence de chaque paramètre et excitation du modèle sur la sortie qu'il fournit, et d'exhiber les paramètres et excitations les plus influents. Elle a été utilisée pour la première fois dans notre domaine par le SERI [Judkoff 83] et ensuite appliquée par d'autres équipes de recherche [Lomas 87], [Lomas 92], [Dalibor Vytacil 93].

A chaque simulation, une seule entrée est modifiée, les autres restant inchangées. Chaque entrée appartient à un intervalle de confiance, défini par une valeur minimale et une valeur maximale. Il en résulte un intervalle sur la sortie du modèle. Lorsque toutes les simulations sont effectuées par tous les paramètres, la sensibilité totale est déterminée. Cette dernière procédure n'est valable que si le système est fortement linéaire, ce qui semble être le cas dans les quelques travaux publiés sur ce sujet en thermique des bâtiments. ([Rahni 98] pour CLIM2000[Rongère 90], [Aude 98] pour CASSIS). Pour tester la linéarité par rapport à un paramètre, Lomas propose de simuler le modèle pour des variations de  $-\Delta\alpha$  et  $+\Delta\alpha$ , et de tester la symétrie des résultats par rapport aux valeurs de base [Lomas 92], pour les logiciels ESP [Clarke 85], HTB2 et SERI-RES [Martin 93]. Rahni teste  $\Delta\alpha$  et  $5\Delta\alpha$  et vérifie qu'un rapport 1/5 est obtenu entre les marges d'erreur [Rahni 98], sur le cas ETNA.

Dans cette même démarche, les travaux de Depecker [Depecker 92] traitent des applications du nombre de conditionnement à l'analyse de sensibilité au bruits de mesure. Le chapitre III, traitant de l'application des concepts de l'automatique des systèmes d'état, apporte une solution partielle au problème de l'incertitude alors générée.

### 2.2.3. Méthodes stochastiques

L'Analyse de Sensibilité Stochastique (SSA), cherche également à déterminer la sensibilité de chaque paramètre pris individuellement sur la précision du résultat. A contrario des deux techniques précitées, où les paramètres sont modifiés avant la simulation mais restent constants pendant toute sa durée, les paramètres varient ici au cours de la simulation à chaque pas de temps. Il s'agit donc d'une technique plus complexe qui nécessite une implémentation difficile.

#### 2.2.4. Autres méthodes

A coté des grands groupes de méthodes évoqués précédemment, d'autres travaux sont menés, avec pour certains des applications assez ponctuelles ou encore possible dans notre domaine. Citons ainsi la bifurcation séquentielle [BettonVil 96], le screening par groupes ou encore les méthodes dites FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test).

La méthode RSM (Response Surface Methodology) a retenu notre attention et nous y reviendrons au paragraphe IV pour illustrer le lien avec une démarche d'analyse de sensibilité que nous proposons. Elle consiste à substituer au modèle complexe un modèle simplifié pour lequel chacune des sorties est approchée par une fonction polynomiale. Ce modèle simplifié permet alors aisément d'avoir accès aux sensibilités élémentaires ou encore à l'incertitude. Cependant, la qualité des résultats est étroitement liée à celle de l'ajustement du modèle RSM (dit aussi métamodèle) et du modèle complexe de départ.

#### 2.2.5. Synthèse :

Lomas a comparé et appliqué les trois premières techniques pour déterminer la précision de trois codes de simulation [Lomas 92], à savoir ESP [Clarke 85], HTB2 et SERIRES. Il résulte de cette étude que les deux techniques les plus adaptées à notre domaine d'étude sont les méthodes de Monte-Carlo et l'analyse de sensibilité différentielle. La MCA et la DSA peuvent s'appliquer à une grande variété de codes de calcul, que ce soit en régime dynamique ou permanent. La SSA s'applique seulement aux programmes utilisant les différences finies.

Indépendamment de notre domaine, Kleijnen note que la méthode à utiliser pour un objectif donné est souvent spécifique au problème [Kleijnen 97] et pose le problème pour un non spécialiste de l'analyse de sensibilité et d'incertitude. Ce constat rejoint celui de la spécialisation de certaines équipes sur cet aspect dans notre domaine. En thermique des bâtiments, les quelques auteurs précédemment cités ayant effectué des travaux notables soulignent (en particulier pour les techniques évoquées au paragraphe précédent) le manque de recul, de retour d'expérience ou encore la présence d'avancées théoriques sans applications publiées à ce jour.



### 3. INTEGRATION DANS L'ENVIRONNEMENT *CODYRUN* :

*CODYRUN* décrivant n'importe quel bâtiment, les outils d'analyse de sensibilité ou d'incertitude intégrés à l'application doivent s'appliquer à tout bâtiment décrit. Les paragraphes suivants détaillent les apports à *CODYRUN* au niveau de l'analyse d'incertitude et évoquent ceux en cours liés à la sensibilité.

#### 3.1. Analyse d'incertitude :

Dans notre démarche de validation, le premier objectif que nous sommes fixés est celui de l'analyse d'incertitude générée par la méconnaissance des paramètres d'enveloppe et des modèles associés.

##### 3.1.1. Organisation des traitements

Dans un souci de rapidité de mise en œuvre, la démarche qui a tout d'abord été la nôtre a été d'intégrer cette analyse au sein du code *CODYRUN*. Pour un bâtiment quelconque, l'outil peut alors être utilisé classiquement pour une simulation ou pour un nombre de simulations fixé pour réaliser une analyse de sensibilité ou d'incertitude. Dans cette approche, nous tirons pleinement parti d'une part de l'entière maîtrise du code (c'est cependant la contrepartie d'un long travail de développement préalable) et de la modularité qui avait été l'une des contraintes fortes lors de notre cahier des charges. La figure suivante fait le parallèle entre les différentes étapes d'une simulation *simple (one at a time)* et d'une analyse de sensibilité ou d'incertitude automatique.

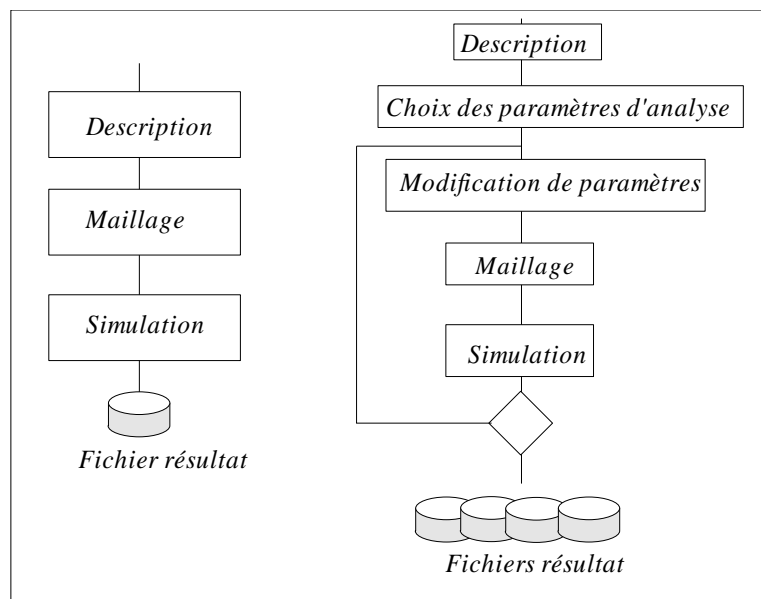


Figure 26 : Parallèle entre simulation et analyse d'incertitude automatique

Cette organisation des traitements tire parti de l'architecture de notre application, dans laquelle la structure de données correspondant au maillage joue un rôle central.

Par rapport aux sorties existantes (un fichier résultat dont le nom est spécifié lors du lancement d'une simulation simple), une modification apportée a consisté à concaténer le nom de fichier base avec un numéro incrémental (de 1 à 100 par exemple), permettant de différencier les noms des fichiers résultat de chaque simulation de l'analyse de sensibilité.

Nous avons souligné en introduction générale que de par la complexité des problèmes auxquels s'attachent depuis peu les thermiciens du bâtiment (bâtiments présentant un grand nombre de zones, prise en compte des phénomènes aérauliques, dispersion des polluants, migration de l'humidité au sein des parois, couplage avec des systèmes de traitement d'air, ...), l'accroissement du temps calcul est le plus souvent à peine contenu par la puissance disponible, pourtant de plus en plus importante sur des machines courantes. L'analyse de sensibilité ou d'incertitude, conduisant le plus souvent à un nombre important de simulations (100 étant un nombre typique), repose ce problème de manière accrue.

Par ailleurs, cette méthode, bien que fonctionnant correctement, possède l'inconvénient de nécessiter des modifications du code (en particulier de la procédure de modification des paramètres), la partie incertitude étant pour l'instant encapsulée dans *CODYRUN*. Beaucoup d'aspects restants encore en suspens (autres paramètres à tester, influence de leur distribution statistique, ...), nous travaillons par ailleurs à séparer les aspects de simulation et d'analyse de sensibilité, ces deux dernières parties communiquant au travers de fichiers. C'est d'ailleurs la démarche recommandée [Fürbringer 99], l'outil d'analyse de sensibilité pouvant alors être appliqué à des codes différents. Cet aspect est abordé au chapitre I, au paragraphe traitant de la recompilation et des modifications à apporter à *CODYRUN*.

### 3.1.2. Le principe de l'analyse MCA (Monte-Carlo Analysis)

Lors d'une simulation simple, les valeurs des paramètres du modèles sont fixées à leur valeurs nominales. Sur le schéma ci-dessous, il s'agit par exemple de la valeur de l'épaisseur des couches et donc des résistances thermiques. A un instant donné, les valeurs de ces paramètres et celles prises par les sollicitations fournissent en sortie une valeur. Lorsque ces dernières évoluent dans le temps, une courbe de réponse classique est obtenue.

Dans le cas MCA, la valeur des paramètres analysés est tirée de manière aléatoire, en faisant l'hypothèse que leur distribution est Gaussienne. En répétant le nombre de simulations, un faisceau de courbes de sortie de courbes est obtenu, permettant de retrouver

[Lomas 92] à chaque instant moyenne et écart type du signal de sortie autour de la valeur moyenne.

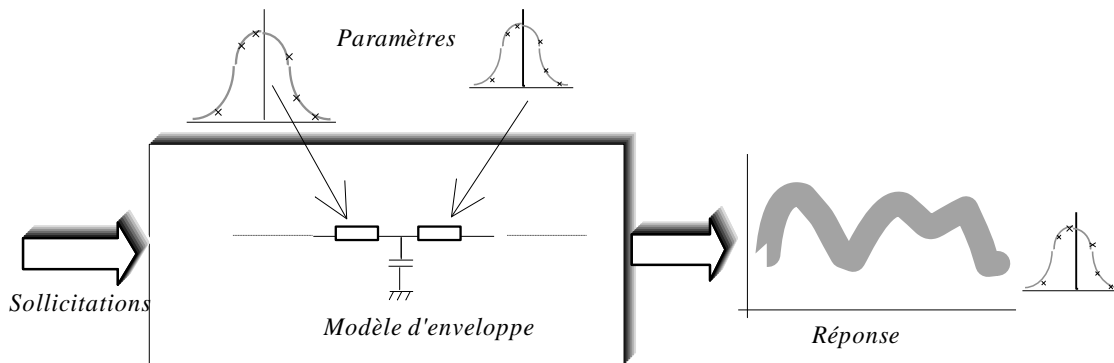


Figure 27 : Le principe de l'analyse paramétrique MCA

Nous utilisons des fonctions de génération de distributions Gaussiennes intégrées au compilateur ou d'autres tirées par exemple de la référence [Press 88] ou [Lomas 92]. Cette dernière référence indique les calculs menant à retrouver la variance de l'écart au départ des simulations effectuées.

### 3.1.3. L'intégration de l'analyse d'incertitude à CODYRUN :

La première fenêtre présentée est celle demandant le nombre de simulations à exécuter et les phénomènes concernés (conduction convection, rayonnement, aéralique, ...). Il est nécessaire de renseigner pour les paramètres de l'analyse une fourchette de variation relative.

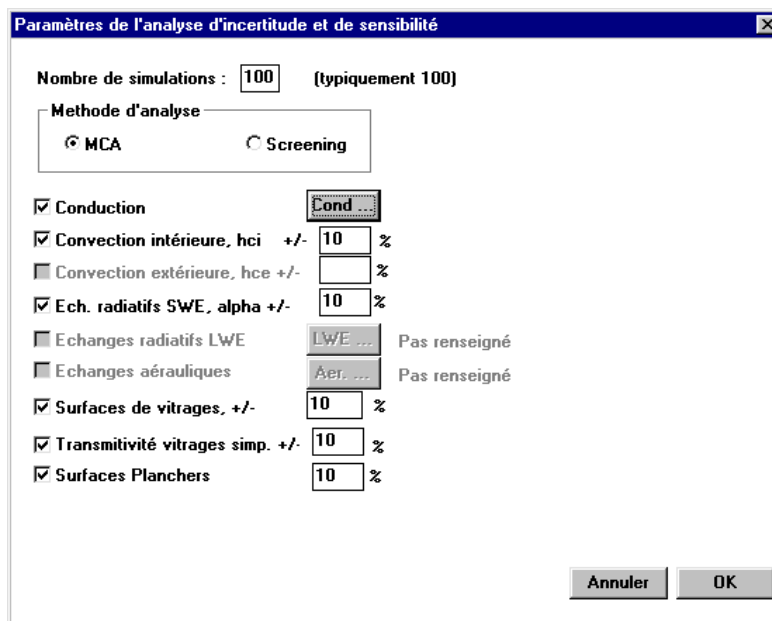


Figure 28 : Fenêtre de l'analyse de sensibilité ou d'incertitude

Pour la conduction, nous avons jugé utile de ne pas traiter l'analyse de manière globale (comme cela aurait été fait en considérant pour un paramètre -  $\lambda$  par exemple – et pour toutes les parois une même incertitude), mais de descendre au niveau des couches élémentaires d'une ou de plusieurs parois. La fenêtre suivante propose ainsi de moduler la conductivité thermique du matériau *Polyuréthane* de certaines parois. Ce niveau de détail est à relier aux nouveaux travaux que nous entreprenons concernant les parois complexes (Thèse F. Miranville).

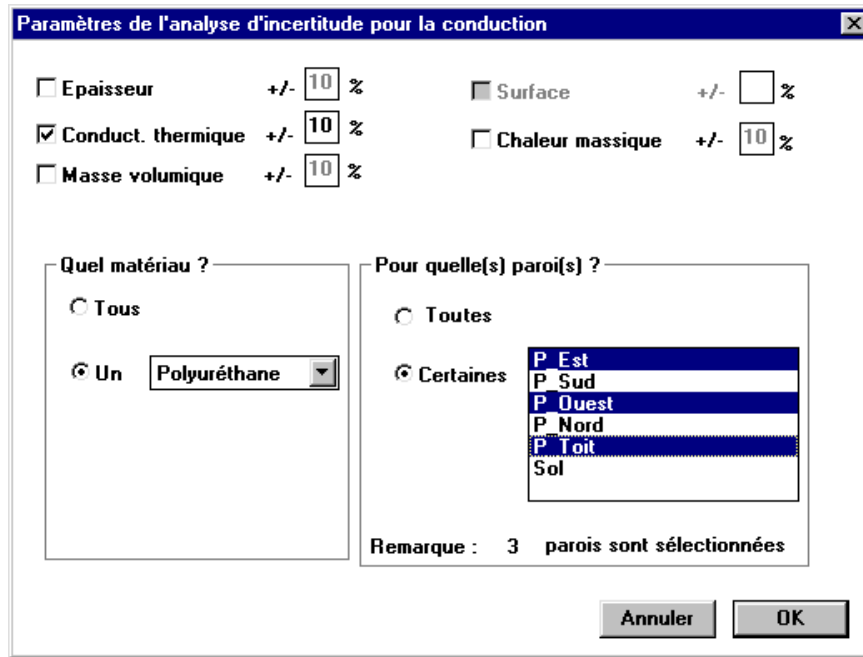


Figure 29 : Fenêtre d'analyse d'incertitude concernant la conduction

Entre deux simulations (lesquelles sont lancées sans intervention extérieure), chacun des paramètres choisis évolue selon une loi Gaussienne (centrée sur la valeur nominale). Un jeu de paramètres (chacun tiré aléatoirement) permet d'obtenir une simulation.

En guise d'illustration, la figure ci-contre trace pour une séquence de 10 jours et la cellule expérimentale *LGI*, les écarts (pour 50 simulations) par rapport au cas de base en conduisant une analyse d'incertitude avec les paramètres de la figure précédente, en admettant pour tous les paramètres une incertitude de 10%.

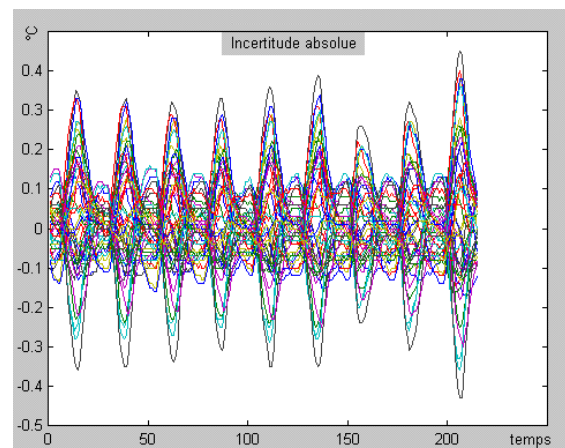


Figure 30 : Incertitude absolue, LGI, 10%

Ainsi, sur le cas présenté, l'incertitude sur le modèle est au maximum de 0.5 °C, atteint pendant la journée, la valeur diurne étant inférieure à 0.2 °C. Le tracé simultané des courbes d'évolution du rayonnement permet de constater que l'incertitude est maximale pendant les journées ensoleillées. Cette information est intéressante, mais elle ne permet pas d'identifier les paramètres responsables de cette incertitude.

### **3.2. Analyse de sensibilité**

Le paragraphe suivant propose une nouvelle technique pour l'analyse de sensibilité dont l'intégration à *CODYRUN* est en cours. Moyennant un nombre de simulations conséquent, (1024 pour 120 paramètres dans l'exemple traité), cette méthode originale de screening (détermination des paramètres les plus influents) possède l'avantage de quantifier de plus la contribution de chacun des paramètres analysés à la variance de l'écart.

## **4. UNE CONTRIBUTION METHODOLOGIQUE A L'ANALYSE DE SENSIBILITE :**

Cette partie fait l'objet d'une publication que nous avons soumise [Mara 99] et nous ne présenterons ici que le principe et une application de la méthode. Cette dernière basée sur l'analyse spectrale permet d'estimer l'influence des paramètres sur les résultats de simulation. Notre approche s'apparente plus aux méthodes stochastiques d'analyse de sensibilité, de par le fait qu'elle requiert plusieurs simulations, à ceci près qu'elle est basée sur des simulations déterministes, c'est à dire que les variations des paramètres sont connues à chaque itération. De plus, les facteurs varient simultanément, ce qui permet de tenir compte de leurs interactions.

Dans un premier temps, nous décrivons la technique proposée et nous montrons l'analogie avec l'approche métamodèle (l'analyse de régression).

### **4.1. La méthode proposée :**

L'idée est d'associer à chaque paramètre une signature (fréquence) qui lui est propre propagée dans le modèle. En vérifiant la présence de ces informations en sortie, il est possible de conclure qualitativement sur la sensibilité du modèle. De plus, l'influence de chacun d'eux est accessible, selon l'intensité de l'information en sortie. Ce dernier point est très important car cela revient à déterminer un *indice de sensibilité* qui permet de quantifier l'influence de chacun des paramètres et d'exhiber ainsi les paramètres les plus influents (screening).

D'une simulation sur l'autre, chaque paramètre suivant un sinus (i.e. de manière périodique). Ainsi la signature associée est une fréquence, ce qui est illustré par la figure suivante. Cette information peut se rechercher en sortie en calculant la Transformée de Fourier (FT) ou la Densité Spectrale de Puissance (PSD) des résultats de simulation.

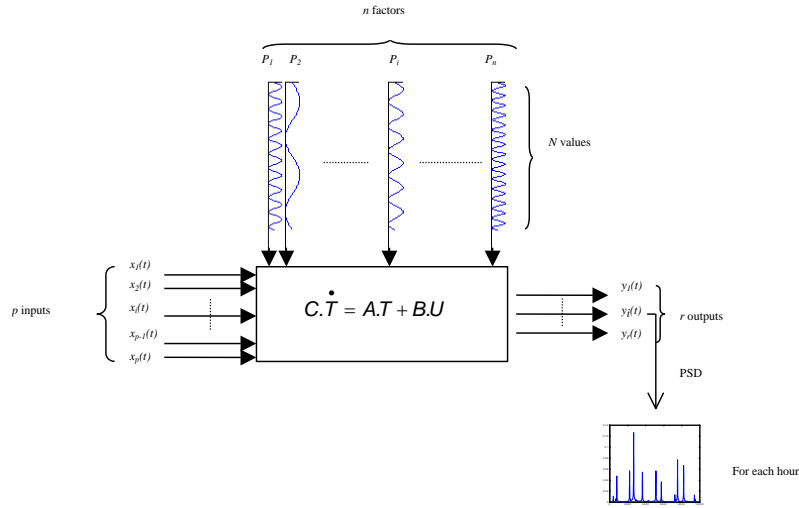


Figure 31: Principe de la méthode proposée

Considérons un modèle à  $k$  paramètres et une sortie  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_h, \dots, X_k)$  et effectuons des simulations en faisant varier chaque facteur suivant un sinus de fréquence différente pour chacun d'eux de telle sorte que :

$$X_h = X_{base} \cdot (1 + \Delta \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f_h)), \text{ soit } X_h \in [X_{base} - \Delta \cdot X_{base}, X_{base} + \Delta \cdot X_{base}]$$

où  $X_{base}$  est la combinaison de base des facteurs.

Dans le cas où le modèle est linéaire vis à vis des paramètres, les fréquences associées aux facteurs doivent se retrouver dans le vecteur  $\Delta Y = Y_{base} - Y$

où  $Y_{base}$  est le résultat obtenu en considérant  $X_{base}$  et  $Y$  est le vecteur résultat des différentes simulations.

Autrement dit,  $\Delta Y$  est une superposition de sinus. D'où le résultat suivant :

$$\Delta Y = \sum_{h=1}^p a_h \cdot \sin(2\pi \cdot f_h), \text{ où } p \leq k \text{ selon l'influence de chacun des paramètres.}$$

Si le modèle n'est pas linéaire, mais comporte des interactions d'ordre 2 entre les différents facteurs nous obtiendrons alors :

$$\Delta Y = \sum_{h=1}^p a_h \cdot \sin(2\pi \cdot f_h) + \sum_{h=1}^q \sum_{h'=1}^q a_{hh'} \cdot \sin(2\pi \cdot f_h) \cdot \sin(2\pi \cdot f_{h'}) \quad (1)$$

Les coefficients  $a_h$  et  $a_{hh'}$  renseignent ainsi sur l'importance du facteur  $h$  sur les résultats de simulation. La TF de  $\Delta Y$  précédente fournit alors :

$$TF_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^k \frac{a_h}{2} \cdot \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \frac{a_{hh'}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] \quad \forall f_h \geq 0$$

avec  $\delta(f)$  la fonction de Dirac,  $TF_{\Delta y}(f)$  la FT de  $\Delta Y$  et  $a_h$  &  $a_{hh'}$  les coefficients de Fourier.

Si au lieu de calculer la TF, nous calculons la PSD, l'équation se transforme alors en :

$$\Gamma_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^k \frac{a_h^2}{2} \cdot \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \frac{a_{hh'}^2}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] \quad \forall f_h \geq 0$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta y}^2 &= \int_0^{+\infty} \left( \sum_{h=1}^k a_h^2 \cdot \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k a_{hh'}^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] \right) df \text{ car } \Gamma_{\Delta y} \text{ est pair} \\ \Leftrightarrow \sigma_{\Delta y}^2 &= \sum_{h=1}^k a_h^2 + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k a_{hh'}^2 \\ \Leftrightarrow I &= \sum_{h=1}^k \frac{a_h^2}{\sigma_{\Delta y}^2} + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \frac{a_{hh'}^2}{\sigma_{\Delta y}^2} \end{aligned}$$

Ainsi, la valeur des coefficients de Fourier renseigne directement sur l'importance de l'influence de chaque facteur.

## 4.2. Le lien avec l'analyse de régression

L'analyse de régression consiste à approcher le modèle aussi complexe soit-il par un polynôme appelé métamodèle. Dans l'hypothèse où le modèle peut être représenté de manière satisfaisante par un polynôme du second ordre (ce qui signifie que les interactions d'ordre supérieur à 2 sont négligeables), la relation suivante est obtenue :

$$y_i = \beta_0 + \sum_{h=1}^k \beta_h x_{ih} + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \beta_{hh'} x_{ih} x_{ih'} + \varepsilon_i \quad \forall i \in [1, n] \quad (2)$$

avec :

$y_i$  : résultat de simulation pour le jeu de paramètres  $i$

$x_{ih}$  : valeur du facteur  $h$  normalisé dans le jeu de combinaison  $i$  (voir plus loin)

$\beta_0$  : coefficient de régression représentant la moyenne des résultats de simulation

$\beta_h$  : coefficient représentant l'influence au premier ordre du facteur  $h$  ( $X_h$ )

$\beta_{hh'}$  : coefficient représentant les effets d'interaction entre les facteurs  $h$  et  $h'$

$\varepsilon_i$  : terme d'erreur du modèle de régression pour le jeu de paramètres  $i$

$n$  : nombre de jeu de paramètres utilisés.

Ainsi, l'importance de l'influence relative d'un facteur est mesurée par la valeur absolue de  $\beta_h$ , de même que la mesure de l'influence de l'interaction entre deux paramètres est obtenue grâce à  $\beta_{hh}$ . Pour déterminer les coefficients  $\beta_h$  et  $\beta_{hh}$ , il faut effectuer un ensemble de  $n$  simulations avec des jeux de paramètres (ou facteurs) différents dont les valeurs explorent les domaines de variation qui leur sont affectés de manière stochastique. Puis, il faut normaliser les valeurs des facteurs en utilisant la relation suivante :

$$x_{ih} = (X_{ih} - b_h) / a_h$$

en posant :  $X_{ih}$  la valeur non normalisée du facteur  $h$

$$b_h = (u_h + l_h) / 2 \text{ où } u_h \text{ et } l_h \text{ sont tels que } X_{ih} \in [u_h, l_h]$$

$$a_h = (u_h - l_h) / 2$$

Enfin, les valeurs approchées des coefficients de régression s'obtiennent en utilisant un algorithme d'optimisation minimisant par exemple un critère quadratique.

Nous venons de voir que la méthode de l'analyse de régression consiste à approcher le modèle par un polynôme (cf. équation 2). Prenons la densité spectrale de puissance de cette équation centrée (après avoir enlevé la moyenne c-a-d le terme  $\beta_0$ ), nous obtenons :

$$\Gamma_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^k \beta_h^2 \cdot \Gamma_{x_h}(f) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \beta_{hh'}^2 \cdot \Gamma_{x_h}(f) * \Gamma_{x_{h'}}(f) + \Gamma_{\varepsilon}(f) \quad (3)$$

où \* est le produit de convolution.

$\Gamma_{x_h}(f)$  est la PSD de  $X_h$

$\Gamma_{\Delta y}(f)$  est la PSD de  $Y - \beta_0$

$\Gamma_{\varepsilon}(f)$  est la PSD de  $\varepsilon$

Calcul de  $x_h$ , la valeur de  $X_h$  normalisé:

Supposons que la valeur de base de  $X_h$  est  $X_{base}$

La méthode que nous avons introduite implique :  $X_h = X_{base} \cdot (1 + \Delta \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f_h))$

$$\text{qui assure } X_h \in [X_{base} - \Delta \cdot X_{base}, X_{base} + \Delta \cdot X_{base}]$$

Compte tenu de l'équation 3 :  $x_h = (X_h - b_h) / a_h$

$$\text{avec ici } b_h = (u_h + l_h) / 2 = (X_{base} + \Delta \cdot X_{base} + X_{base} - \Delta \cdot X_{base}) / 2 = X_{base}$$

$$\text{et } a_h = (u_h - l_h) / 2 = (X_{base} + \Delta \cdot X_{base} - X_{base} + \Delta \cdot X_{base}) / 2 = \Delta \cdot X_{base}$$

$$\text{d'où } x_h = (X_h - b_h) / a_h = (X_h - X_{base}) / \Delta = \sin(2 \cdot \Pi \cdot f_h) \text{ ainsi } x_h \in [-1, 1]$$

Ainsi les  $x_h$  sont des sinus normalisés aux fréquences  $f_h$ , ce qui fait que l'équation 3 devient:



$$\Gamma_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^k \frac{\beta_h^2}{2} \cdot \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \frac{\beta_{hh'}^2}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{2} \cdot \delta(f) \quad \forall f_h \geq 0 \quad (4)$$

qui donne

$$2 \cdot \Gamma_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^k \beta_h^2 \cdot \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \beta_{hh'}^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] + \sigma_\varepsilon^2 \cdot \delta(f) \quad \forall f_h \geq 0$$

et  $\sigma_\varepsilon^2$  la variance de  $\varepsilon$

En supposant que le métamodèle proposé soit suffisamment bien estimé pour considérer que le terme d'erreur soit considéré comme un bruit blanc, ce qui explique le dernier terme.

L'analyse de l'équation (4) amène à quelques résultats :

(1) Les coefficients de Fourier au carré obtenus par la méthode proposée correspondent aux coefficients de régression au carré obtenus dans le cadre de l'approche métamodèle. Le facteur 2 est dû au fait que l'on ne considère que les fréquences positives étant donné que le spectre est pair.

(2) Nous savons que  $\sigma_{\Delta y}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{\Delta y} df$  variance de  $\Delta y$ , nous constatons alors que le rapport  $\frac{\sigma_y^2}{\beta_h^2}$

représente la part de la variance des résultats de simulation expliquée par le facteur  $h$ .

(3) Les effets d'interactions entre les paramètres ont pour conséquence d'engendrer des fréquences supplémentaires de même amplitude. Pour cette comparaison, les interactions d'ordre 2 engendrent 2 fréquences qui sont  $|f_h - f_{h'}|$  et  $(f_h + f_{h'})$ . Nous pouvons déduire alors que des interactions d'ordre  $p$  engendrent  $2^{p-1}$  fréquences.

Ce dernier résultat amène à quelques commentaires :

- d'abord, si on veut retrouver les fréquences liées aux interactions, il suffit que chaque fréquence ne puisse s'écrire comme la combinaison linéaire des autres fréquences avec des coefficients entiers.
- Ensuite, la fréquence  $(f_h + f_{h'})$  peut ne pas respecter la condition de Shannon ce qui aurait pour conséquence, l'apparition d'une fréquence égale à  $(f_e - f_h - f_{h'})$ .

Pour éviter un problème de localisation de fréquences, il faut soit prendre une fréquence d'échantillonnage grande, soit faire en sorte que chaque fréquence ne puisse s'écrire comme étant égale à  $f_e$  moins toute combinaison linéaire des autres fréquences.

### 4.3. Une application avec la cellule expérimentale

Cet exemple a pour objet de montrer l'apport de cette approche dans les étapes dites screening et d'analyse de variance. Le modèle considéré est celui de la cellule expérimentale LGI. Pour ce bâtiment, nous disposons d'un fichier météo (sollicitations) et un jeu de 120 paramètres. Nous cherchons à déterminer parmi ces 120 paramètres ceux qui sont les plus influents (en considérant comme sortie la température sèche d'air) et à quantifier la part de la variance expliqués par chacun d'eux.

Nous effectuons 1000 simulations en faisant varier chaque paramètre de  $\pm 10\%$  de leur valeur de base et en leur ayant affecté une fréquence différente.

Pour exemple, le spectre de sortie à une heure de la journée permet d'identifier à un moment donné le paramètre le plus influent (masse volumique de la dalle béton, sur la figure ci-contre). De plus, s'il n'y a pas d'interactions, la hauteur du pic renseigne sur l'influence du paramètre sur la température d'air intérieur. Ainsi, à 6 h, une variation de 10% de la valeur de la masse volumique a pour effet de faire

varier la température sèche d'air intérieur de  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}^2$  soit  $\pm 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

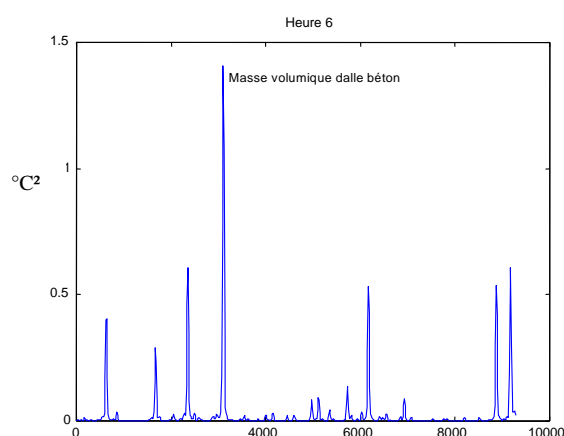


Figure 32 : DSP des écarts à 6h

La figure suivante montre la part de la variance des écarts de la température d'air (sur les 1000 simulations) expliquée par les 6 principaux facteurs, ce heure par heure. Nous constatons alors que ces 6 paramètres expliquent entre 40 et 80% de la variance des écarts observés.

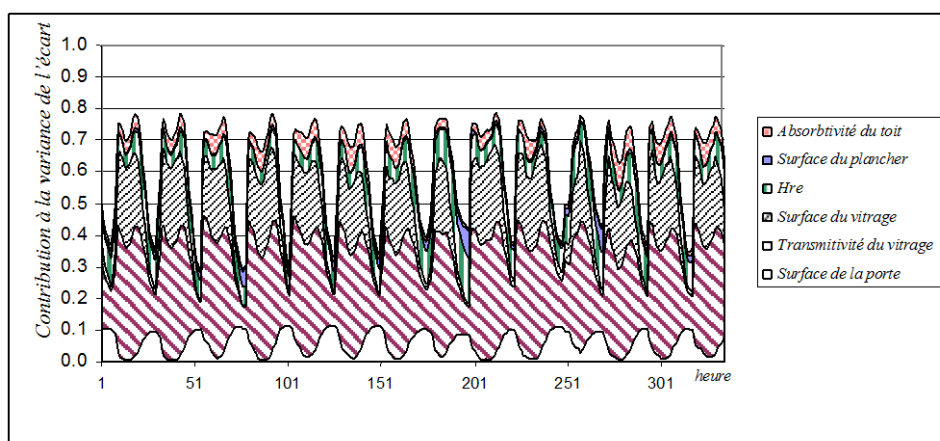


Figure 33 : Décomposition horaire de la variance en fonction des 6 paramètres principaux

L'analyse des spectres montre que la journée, les paramètres du vitrage sont les plus influents leur influence diminuant progressivement pendant la nuit. Nous pouvons voir que l'influence des caractéristiques du béton a lieu surtout la nuit. Nous voyons aussi que la nuit c'est l'influence du coefficient d'échange par rayonnement avec la voûte céleste qui est prépondérante. Les résultats obtenus ne sont guère étonnants. D'une part, le fait que les caractéristiques du vitrages soient les plus influents est tout simplement dû à la constitution même du bâtiment. En effet, ce dernier étant isolé par conduction, la principale source de chaleur est issue du vitrage. Nous remarquerons que le matériau opaque le plus influent est le matériau qui possède un temps de réponse le plus long (très inerte), c'est à dire la dalle en béton, résultat qui sera à rapprocher de l'analyse modale que nous conduirons pour ce même support (au chapitre suivant).

Les résultats obtenus sont très cohérents par rapport au sens physique, particulièrement en ce qui concerne les paramètres conductifs. En effet, l'épaisseur du béton, sa masse volumique et sa chaleur massique sont constitutifs de la capacité thermique du béton alors que l'épaisseur de la porte et sa conductivité correspondent à sa résistance thermique. Ainsi, en ce qui concerne le béton, c'est sa capacité thermique qui influence la température d'air et non sa résistance thermique alors que pour la porte, c'est le contraire.

A priori, puisque tous les pics principaux (les plus forts) visibles sur les spectres de puissance correspondent à des fréquences affectées à des facteurs et qu'il n'existe pas à première vue de fréquences non affectées, il semblerait qu'il n'y ait pas d'interactions entre les facteurs. Cependant, cela peut être aussi dû à la faible plage de variation affectée aux différents paramètres.

Nous noterons la forte influence du coefficient d'échange radiatif avec la voûte céleste, montrant le danger de linéariser ces échanges (si tant est que le modèle est bien implanté). Il serait de plus intéressant, de mener la même étude avec un modèle d'échange par rayonnement différent.

Enfin, nous ajouterons que, dans le cas où les résultats obtenus sont justes, dans le cadre d'une approche métamodèle, un résultat intermédiaire intéressant est que le modèle du bâtiment considéré peut être approché par un polynôme de premier ordre (absence d'interactions). Nous en verrons une application au paragraphe suivant, dans la mesure où cette absence d'interactions permet de considérer le bâtiment comme un système superposable.

En conclusion, cette application dont l'intérêt principal est celui de l'originalité de la méthode proposée est actuellement développée sous MATLAB autour du modèle de la cellule expérimentale. Il est souhaitable de s'intéresser à d'autres supports avant de généraliser certaines conclusions (absence d'interactions en particulier). De même que pour d'autres parties, l'intégration à *CODYRUN* est en cours. Un bâtiment quelconque étant décrit sous cet environnement, la méthode permet en particulier de mieux concevoir les expérimentations (emplacement et choix des capteurs) en vue de la validation du modèle d'enveloppe associé.

## **5. VARIATIONS AUTOUR DE LA CELLULE LGI :**

Cette partie illustre d'autres travaux en cours, croisant les informations issues de *CODYRUN* et ceux conduits sous *MATLAB*, concernant le support expérimental cellule *LGI*.

Pour comparer des informations relatives à la sensibilité et l'incertitude calculées de part et d'autre, il a d'abord été nécessaire de vérifier la concordance des deux modèles de cellule. Rappelons que validation de *CODYRUN* sur le support considéré, la cellule *LGI*, avait conduit à la validation de ce modèle d'enveloppe (cf chapitre I).

### **5.1. Screening et analyse d'incertitude MCA:**

Sur la même séquence de 10 jours que précédemment, une seconde analyse a été conduite, centrée sur les propriétés thermo-physiques des matériaux, en excluant la transmittivité du vitrage; car non intégré au sein à l'analyse d'incertitude dans *CODYRUN* à ce moment. En moyennant sur les 10 jours leur contribution, les résultats suivants peuvent être

trouvés, Ep. étant mis pour épaisseur, Cond pour conductivité thermique, Cp pour chaleur massique et Mv pour masse volumique.

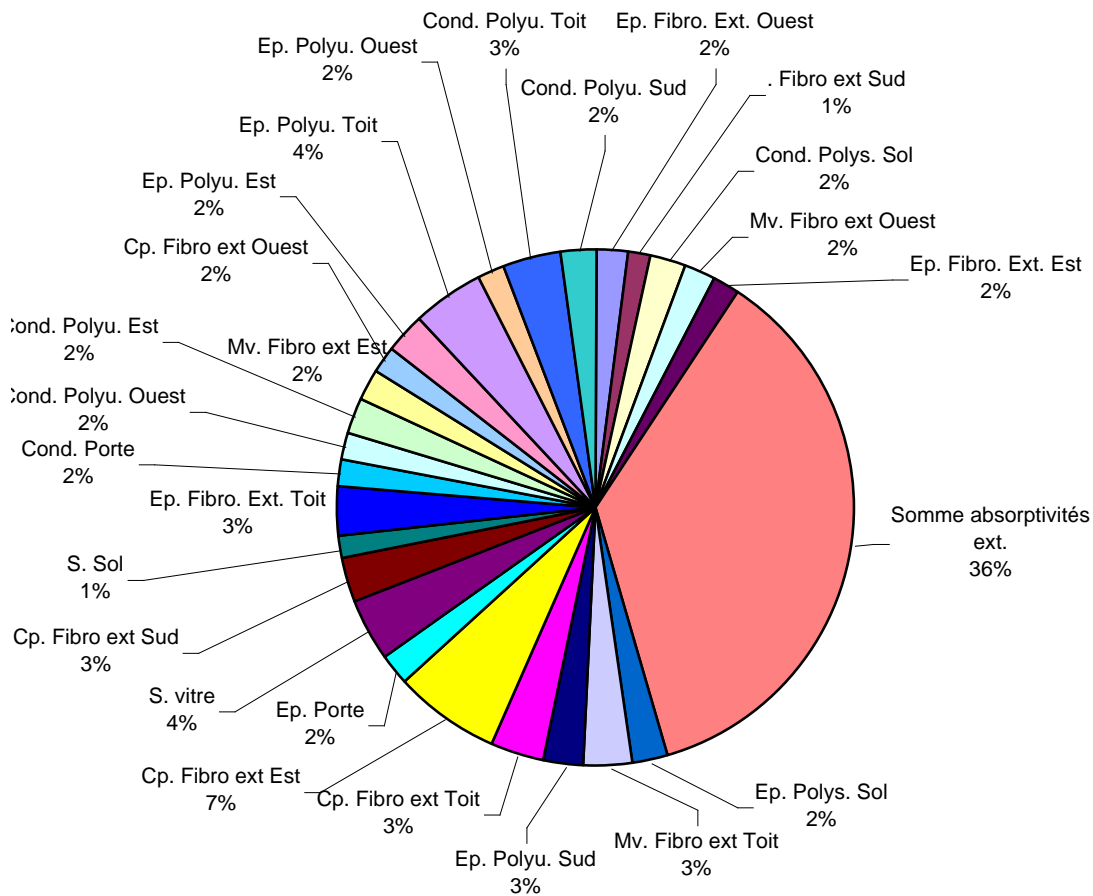


Figure 34 : Pourcentages explicatifs de la variance de l'écart

Dans un premier temps, en considérant au sein de *CODYRUN* une fourchette de 10% pour tous les paramètres, l'incertitude maximale et donc la variance de l'écart peuvent être calculées, en considérant un nombre important de simulations (100).

Dans une seconde phase, la procédure est répétée, mais en ne considérant qu'un seul paramètre (les absorptivités extérieures) connu avec 10% d'incertitude pour lequel la contribution à la variance est connue (36 %). La variance de ce nouvel écart est calculée et le rapport des deux variances est sensiblement égal au pourcentage de la contribution à la variance totale, soit 37 %. La différence peut être due à l'incertitude sur l'estimation de la variance par la méthode MCA qui est de l'ordre de 10 % [Rahni 98].

La démarche exposée précédemment a été conduite pour différents paramètres (ou groupes de paramètres) avec succès sur l'ensemble de la séquence, puis sur certains jours (9 et 11, respectivement ensoleillés et couverts). En conclusion, la répétition de cette procédure conduit à un certain degré de fiabilité de la démarche. Il faut bien noter que, au sein de CODYRUN, de part le calcul de l'incertitude par la méthode MCA, l'intérêt en terme de temps calcul est nul, dans la mesure où le nombre de simulations à conduire pour obtenir une estimation convenable de la variance ne dépend pas du nombre de paramètres considéré.

## 5.2. Screening, DSA et analyse d'incertitude MCA :

L'analyse précédente a montré pour le cas cellule LGI et les fourchettes de variations choisies (+/-10%) une absence d'interactions entre les paramètres étudiés. Dans ce cas, le système se comporte comme un système linéaire. Ce préalable étant assuré, le calcul de l'incertitude pour un groupe de  $n$  paramètres peut s'effectuer (plus rapidement que par MCA) grâce à la DSA, c'est à dire au départ des sensibilités individuelles trouvées en effectuant  $n$  simulations différentes. Dans chacune de ces simulations, tous les paramètres sauf un conservent leurs valeurs nominales.

En ne considérant qu'un seul paramètre, nous avons effectué une simulation en faisant varier de 10% la valeur du coefficient de transmission du vitrage. Puis, l'écart (entre la température obtenue avec la valeur de base de  $\tau$  et celle obtenue après variation) est calculé élevé au carré et tracé heure par heure sur la figure suivante, de même que le coefficient de Fourier au carré (de la fréquence correspondante).

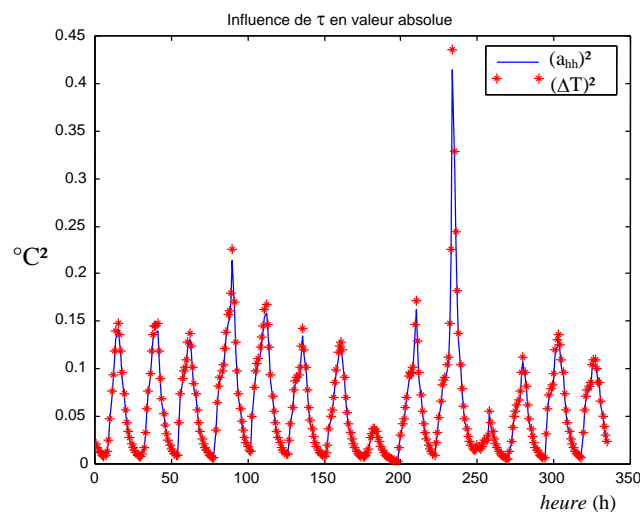


Figure 35 : Influence de  $\tau$  en valeur absolue

La figure précédente illustre l'égalité des coefficients de Fourier au carré (les coefficients de la DSP) pour une fréquence donnée (d'un paramètre donné) et des écarts au carré. (cf paragraphe 4.1 de ce même chapitre).

## 6. QUELQUES PERSPECTIVES EN LIAISON AVEC NOS AUTRES TRAVAUX :

A côté des applications *naturelles* (diagnostic, DOE, aide à la conception), bon nombre de liens peuvent être explorés entre des thèmes existants ou à venir au sein de l'équipe, tant vis à vis d'aspects expérimentaux que de la modélisation (notion de qualité de modèle en particulier). Ainsi, sans citer tous les développements possibles (sensibilité associée à la modélisation hybride, observateur et analyse d'incertitude, analyse sensibilité sur un métamodèle, ...), certaines pistes peuvent être indiquées :

- Sensibilité des modèles de bâtiments aux sollicitations météorologiques

Une précédente thèse évoquée au premier chapitre s'est attachée à la génération de séquences climatiques type [Adelard 99]. Pour illustrer cette étude, bon nombre de simulations (*one at a time*) avaient été effectuées avec *CODYRUN*, alimenté par des séquences climatiques générées par *RUNEOLE*. L'analyse de sensibilité non paramétrique (actuellement en cours d'intégration au code) permettrait d'amener des éléments comparatifs intéressants. Le chapitre suivant, en considération de la forme d'état du système d'équations, propose une voie directe (algébrique) pour accéder à l'incertitude générée par l'imprécision des paramètres météorologiques.

- Sensibilité de modèles réduits (au sens des systèmes d'état)

Le chapitre suivant propose des éléments de réflexion entre le lien entre analyse modale et analyse de sensibilité. A notre connaissance, beaucoup de questions restent suspens concernant les modèles réduits, telle que la conservation de l'incertitude ou de la sensibilité lors de la réduction. Si toutefois la réponse à la question précédente était positive, l'enjeu serait de taille, dans la mesure où les analyses de sensibilité, consommatrices de temps calcul, s'en trouveraient simplifiées.

- Extension de la méthode MCA à l'aéraulique

Dans notre domaine, les transferts aérauliques ont posé et posent encore de nombreux problèmes de modélisation. Dans le cas des modèles en pression tel que celui intégré à *CODYRUN*, certains d'entre eux sont évoqués dans [Boyer 99]. C'est pourquoi certains thermiciens du bâtiments ne se sont intéressés qu'à la sensibilité et incertitude en aéraulique [Fürbringer 96], [Fürbringer 99]. Le problème typique qui se pose est celui des valeurs à adopter pour les ouvertures, en terme de perméabilités ou d'exposants caractéristiques d'écoulement. L'extension aux paramètres aéraulique de la méthode MCA dans *CODYRUN* sera conduite dans cette optique.

- Dérivation des équations de sensibilité

La référence [Rao 93] fait état pour l'aéraulique de la possibilité de différentier automatiquement les équations de l'aéraulique pour déterminer directement les coefficients de sensibilité de la partie aéraulique (sans pour cela nécessiter un nombre de simulations important). Les auteurs avaient au préalable montré qu'au moyen d'un formalisme systématique, il leur était possible de bâtir le modèle aéraulique d'un bâtiment [Haghighat 91]. Tirant parti de notre spécificité en génération automatique de modèles [Boyer 96][Boyer 99], cet aspect fera l'objet de développements spécifiques à moyen terme.





## *Automatique des systèmes d'état et thermique des bâtiments*

L'application des concepts de l'automatique s'est comme dans de nombreuses disciplines avérée une démarche très féconde. Après les premiers développements associés à l'analogie thermo-électrique [Ness 49], l'application des méthodes matricielles pour le traitement de la conduction unidirectionnelle dans les parois multicouches, de nombreux travaux ont concerné l'application des méthodes dites de transfert au niveau de la conduction thermique, mais aussi du comportement thermique global d'une ou plusieurs pièces [Mitalas 67]. Vis à vis de la conduction thermique au sein des parois, après les méthodes basées sur la troncature des séries de Fourier, celles visant à l'identification de filtres pour la modélisation de la propagation thermique à l'aide de réseaux capacitifs ont longtemps été au cœur de la problématique de la thermique des bâtiments. Des améliorations sont toujours d'actualité dans ce domaine. A cet effet, l'utilisation de la transformée de Laplace s'est généralisée, tant dans les cas monovariabiles (E/S en températures) que dans ceux associés à la méthode des quadripôles (les vecteurs d'entrée et de sortie sont de dimension 2 et concernent température de surface de densité de flux thermique). L'étape suivante a été celle des systèmes d'état.

Le formalisme d'état issu de l'automatique *moderne* conduit en thermique des bâtiments à des applications intéressantes tant du point de vue de la compréhension, de l'analyse, de la synthèse ou de la commande de ces systèmes. Les aspects concernés par ce dernier chapitre sont ainsi d'ordre conceptuel (identification des modes propres par exemple), numériques (réduction sans perte de précision notable de la taille des systèmes à résoudre) ou encore expérimentaux (utilisation de la théorie des observateurs).



<b>1.</b>	<b>L'APPLICATION DE L'AUTOMATIQUE LINEAIRE MONOVARIABLE AU BATIMENT :....</b>	<b>92</b>
<b>2.</b>	<b>LE FORMALISME D'ETAT :.....</b>	<b>92</b>
<b>3.</b>	<b>RAPPELS SUR LA METHODE MODALE :.....</b>	<b>95</b>
3.1.	ANALYSE MODALE.....	95
3.2.	REDUCTION MODALE : .....	97
3.3.	SYNTHESE MODALE : .....	97
<b>4.</b>	<b>LIMITATIONS ET AMENAGEMENTS POUR CODYRUN : .....</b>	<b>98</b>
4.1.	THERMO-AERAULIQUE ET STATIONNARITE.....	98
4.2.	LE CHOIX DES VARIABLES DE SOLLICITATIONS RADIATIVES EXTERIEURES .....	99
4.3.	NECESSITE DE L'ECRITURE DE BILANS DE FLUX : .....	99
4.4.	LE TRAITEMENT DES ECHANGES RADIATIFS INTERIEURS DE GRANDE LONGUEUR D'ONDE : .....	100
4.5.	PRISE EN COMPTE DE L'INERTIE DES VITRAGES .....	100
<b>5.</b>	<b>APPLICATION DE LA REDUCTION MODALE : .....</b>	<b>100</b>
<b>6.</b>	<b>PERPECTIVES DE RECHERCHE A COURT ET PLUS LONG TERME : .....</b>	<b>104</b>
6.1.	ANALYSE DE SENSIBILITE ET SYSTEME D'ETAT :.....	104
6.1.1.	<i>Analyse non paramétrique :.....</i>	<i>104</i>
6.1.2.	<i>Analyse paramétrique : .....</i>	<i>106</i>
6.2.	APPLICATION DE LA THEORIE DES OBSERVATEURS A LA MESURE :.....	107
6.2.1.	<i>Introduction aux observateurs pour les besoins de la compensation .....</i>	<i>107</i>
6.2.2.	<i>Les différents types d'observateurs :.....</i>	<i>108</i>
6.2.3.	<i>Observateurs pour la mesure en thermique des bâtiments .....</i>	<i>109</i>
6.3.	APPLICATION DE LA REDUCTION EN REGULATION :.....	111
6.3.1.	<i>Formulation modale du problème de régulation.....</i>	<i>111</i>
6.3.2.	<i>Prise en compte de l'intermittence.....</i>	<i>112</i>

## **1. L'APPLICATION DE L'AUTOMATIQUE LINEAIRE MONOVARIABLE AU BATIMENT :**

Notre propos se limite à l'aspect thermique du problème, excluant ainsi la partie aéraulique. Dans cette approche le bâtiment peut être considéré comme un système possédant plusieurs entrées (les sollicitations météorologiques) et une sortie, par exemple la température sèche d'air intérieur. Constitué de plusieurs murs, vitrages, chacun de ces sous systèmes possède une fonction de transfert relative à chaque variable (liant par exemple la température de surface intérieure et la sollicitation considérée). Vis à vis de la conduction, chacune de ces fonctions de transfert est constituée d'un filtre passif et la réponse de l'enveloppe du bâtiment peut être calculée analytiquement. Cependant, cette approche ne fournit des solutions simples que dans le cas d'une évolution harmonique des sollicitations. Ainsi, elle s'accompagne le plus souvent pour des entrées quelconques d'une troncature des termes d'un développement en série de Fourier et de la recombinaison des effets de chacun des harmoniques [Tourrand 91].

Dans le cas passif (évolution de la sortie sous le seul effet des sollicitations), le problème de la stabilité ne se pose pas, en raison du type de fonctions de transfert élémentaires mis en jeu (filtres passifs). Dans le cas de la présence d'un système de traitement d'air, les méthodes classiques d'étude algébriques ou graphiques de la stabilité (Nyquist par exemple) permettent de prévoir la l'instabilité. Celle-ci se traduit par une oscillation de la température sèche d'air intérieure, par exemple dans le cas du sur-dimensionnement du système de traitement associé à un local.

## **2. LE FORMALISME D'ETAT :**

Pour un système monovisible linéaire d'ordre  $n$ , la relation entre l'entrée et la sortie est traduite par une équation différentielle d'ordre  $n$  (liant la sortie et ses  $n-1$  premières dérivées à l'entrée). Son écriture sous forme d'état consiste en la transformation de cette équation différentielle d'ordre  $n$  en autant d'équations différentielles d'ordre 1 et la mise du système obtenu sous forme d'une équation matricielle du premier ordre et de dimension  $n$ . Dans le cas multivariable (entrée et sortie sont des vecteurs de dimension  $>1$ ), le même formalisme est rencontré.

Ce formalisme manipule des objets dont quelques définitions seront rappelées plus en avant, dont l'interprétation est particulièrement féconde en termes d'application concrètes. Ainsi, tout une panoplie des techniques et de ressources mathématiques fiables et rigoureuses devient utilisable, dans le but de réaliser différents objectifs, tels que le développement de modèles, leur analyse ou encore le contrôle.

Vis à vis du phénomène de conduction, la classification des modèles fait apparaître les modèles de transfert (facteurs de réponse, fonctions de transfert en "z", ...) et les modèles dits d'état [Berges 86]. L'analyse modale et les modèles aux différences finies appartiennent à cette dernière catégorie. Faisant appel au calcul opérationnel, les méthodes de transfert au sein des parois ont historiquement été les premières utilisées, au travers des matrices de transfert, permettant ainsi simplement de généraliser la méthode à un nombre de couches quelconque. L'apparition de la théorie des systèmes au cours des années 70, en même temps que l'essor des moyens informatiques, a beaucoup fait évoluer les modèles numériques de la conduction. Dans l'optique de notre outil, nous avons choisi de nous intéresser plus spécifiquement au second groupe de méthodes, à savoir les modèles d'état.

Le vecteur d'état d'un système est le vecteur des variables nécessaires à la connaissance de son état physique. Il constitue l'information minimale à connaître à un instant donné pour pouvoir prédire son évolution future, lorsque l'évolution des commandes et perturbations agissant sur le système en question est connue. En Automatique des systèmes linéaires (éventuellement multivariables) [Gille 84], en négligeant le terme lié aux perturbations, l'écriture sous forme matricielle des équations différentielles régissant le phénomène étudié conduit à une équation dite équation d'état, du type

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t),$$

les éléments  $A$ ,  $B$ ,  $U$ ,  $X$  portant respectivement les noms suivants, matrice d'évolution, matrice d'application de la commande, vecteur commande et vecteur d'état.

Dans le cas de la thermique d'une paroi au sein de laquelle la conduction est considérée comme unidirectionnelle, le vecteur  $X(t)$  est le plus souvent le vecteur champ de température du système. L'équation d'état s'écrit alors sous la forme :

$$C \dot{T}(t) = A T(t) + B U(t)$$

$C$  est une matrice carrée, diagonale dans le cas des différences finies, chaque élément de la diagonale étant la capacité thermique des constituants du domaine considéré (la paroi).  $A$ , matrice carrée, traduit les échanges thermiques entre les éléments du domaine, tandis que  $B$  exprime les liaisons entre l'objet d'étude et son environnement extérieur.  $U(t)$  est alors le vecteur des sollicitations constitué en général de températures et de flux (ou densités de flux).

=====

En plus de cette équation d'évolution d'état, l'équation d'observation exprime alors les sorties du système, et prend la forme suivante :

$$Y(t) = D X(t) + E U(t)$$

Dans les problèmes qui nous concernent, les sorties correspondent à certaines températures et nous avons  $E = [0]$  (matrice nulle). Dans le cas général, les deux équations précédentes répondent au diagramme fonctionnel de la figure suivante :

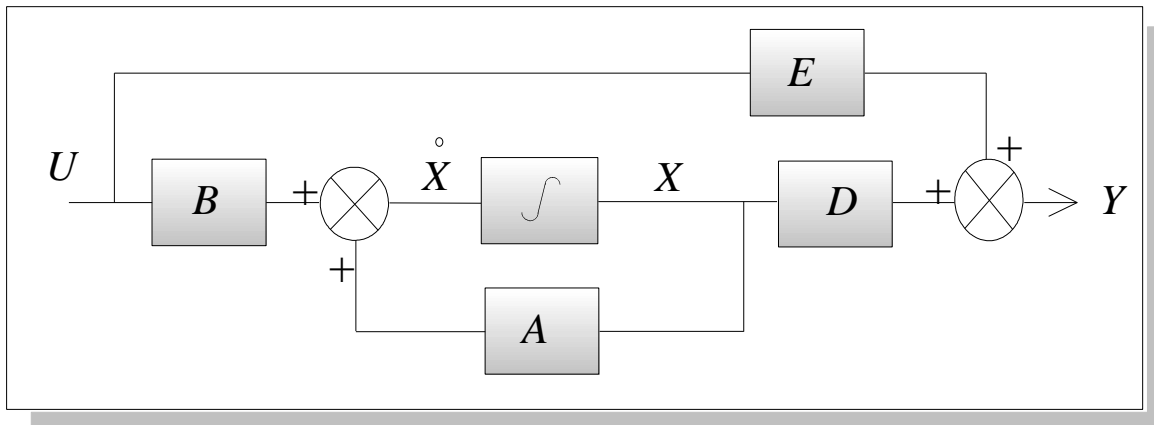


Figure 36 : Schéma fonctionnel des modèles d'état

Les conditions initiales du système,  $X(t_0)$ , étant connues, diverses méthodes de résolution sont alors envisageables. La résolution analytique est très similaire à celle des méthodes de transfert, et fournit une solution de la forme

$$X(t) = e^{A t} X(t_0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B(\tau) U(\tau) d\tau, \quad \text{Eq. 1}$$

dans laquelle sont aisément reconnaissables la réponse libre du système (cas du refroidissement par exemple) et la réponse forcée. Pour notre part, nous avons privilégié les méthodes de résolution basées sur les différences finies.

Les méthodes que nous développeront plus en avant pour cette classe de systèmes font appel à trois propriétés que sont

- la linéarité
- la stationnarité. Cette propriété nécessite l'invariance dans le temps des matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ , conditionnée par des caractéristiques thermo-physiques et des coefficients d'échanges superficiels constants. Elle assure l'existence d'un état stationnaire asymptotique du système, lorsqu'il est soumis à des sollicitations constantes dans le temps.

- la réciprocité. Soient deux points  $M$  et  $N$  d'un système vérifiant les deux propriétés précédentes. Les échanges thermiques entre les deux points s'écrivent alors  $\varphi_{MN} = C_{MN} (T_N - T_M)$  et  $\varphi_{NM} = C_{NM} (T_M - T_N)$ . La réciprocité impose  $C_{MN} = C_{NM}$  et a pour conséquence la symétrie de la matrice des échanges  $A$ .

Cette dernière propriété peut être omise, sous réserve d'un pré-traitement du problème [El Khoury 89]

### 3. RAPPELS SUR LA METHODE MODALE :

En revenant à notre domaine d'application, ces méthodes ont concerné principalement le phénomène de conduction au sein de l'enveloppe. L'objectif de cette partie est de rappeler les fondements de la démarche, sans toutefois détailler l'ensemble des calculs. Le lecteur intéressé pourra se reporter à [Lefebvre 87] ou [Bacot 88].

#### 3.1. Analyse modale

Après discrétisation, la mise en oeuvre de l'analyse modale consiste à passer dans la base propre du système, dans laquelle la matrice d'évolution  $A$  est diagonale. Cette diagonale est formée par les valeurs propres du système (lesquelles sont réelles si  $A$  est symétrique, ce qui est conditionné par la réciprocité du système), alors inverses des temps caractéristiques. En plus de la mise en évidence de ces constantes de temps, cette méthode constitue une méthode de résolution élégante, dans la mesure où l'intégration de l'équation d'évolution d'état est immédiate, toutes les équations élémentaires étant découplées (cf Eq. 1). Elle est donc bien adaptée à la simulation.

L'analyse permet aussi une interprétation des modes propres ainsi que la mise en oeuvre des thermogrammes et spectrogrammes, constituant ainsi de puissants outils d'analyse du comportement du système étudié. Un thermogramme est à un instant donné, la représentation sur un axe de l'ensemble des champs de températures des différents éléments (parois, vitrages, volumes d'air) du système. Sur cet axe, les températures d'air sont représentées plusieurs fois, plusieurs parois étant en contact avec ces volumes. Un exemple de thermogramme est donné sur la figure suivante :



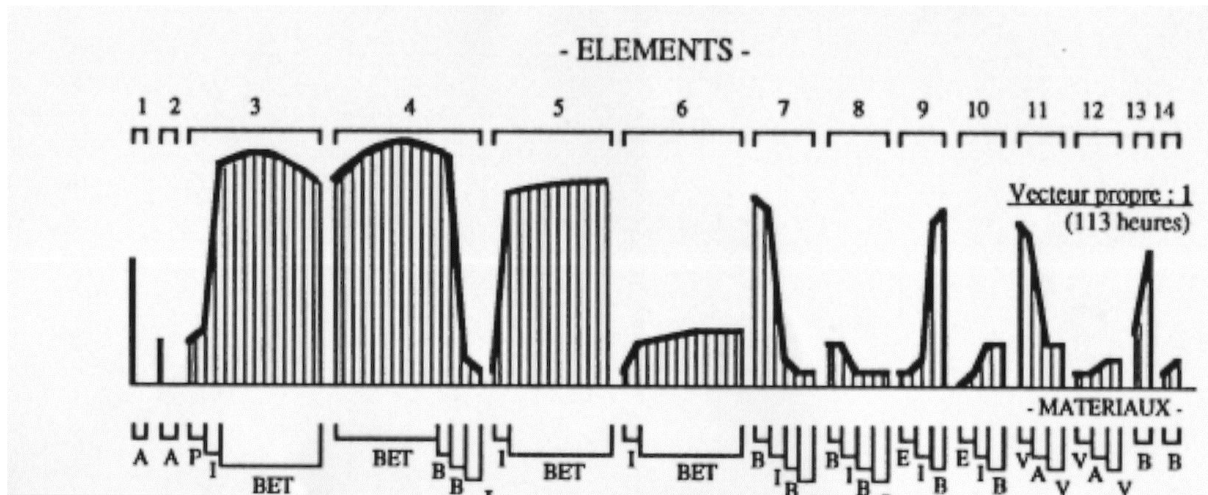


Figure 37: Exemple de thermogramme [Bacot 88]

Le passage dans la base modale fait intervenir une matrice de passage, chacune de ces colonnes étant constituée d'un vecteur propre (correspondant à un mode). Chacun de ces vecteurs propres constitue une certaine distribution de température, représentable à l'aide d'un thermogramme. Chacun de ces vecteurs propres est une distribution particulière des températures du système (cette distribution est le mode) et permet d'interpréter le mode spatialement. L'exemple type est celui de l'accumulation d'énergie dans un plancher (dans le thermogramme, pour la paroi considérée, un lobe important est observé).

Les vecteurs propres formant une base, toute distribution des températures dans le bâtiment peut s'écrire sous forme d'une combinaison linéaire des modes propres. Les modes propres ont une propriété fondamentale en régime dynamique. La forme de leur thermogramme ne change pas au cours du temps et l'effet de ce dernier est entièrement traduit par une multiplication par  $e^{-t/\tau}$ ,  $\tau$  étant le temps caractéristique du mode. La méthode modale est ainsi une méthode de séparation entre la fonction spatiale de la température et la fonction temporelle. Ainsi, pour tout point  $M$  de discrétisation du système soumis à une excitation  $E(t)$ , il est possible d'écrire,  $i$  indiquant les modes propres :

$$T(M, t) = \left( \sum_1^n \Psi_i(M) e^{-t/\tau_i} \right) E(t)$$

Vis à vis des sollicitations, la réponse du bâtiment est à chaque instant une combinaison de la réponse des différents modes. Pour une sollicitation donnée, le spectrogramme trace la contribution relative de chacun des modes dont les temps caractéristiques figurent en ordonnées.

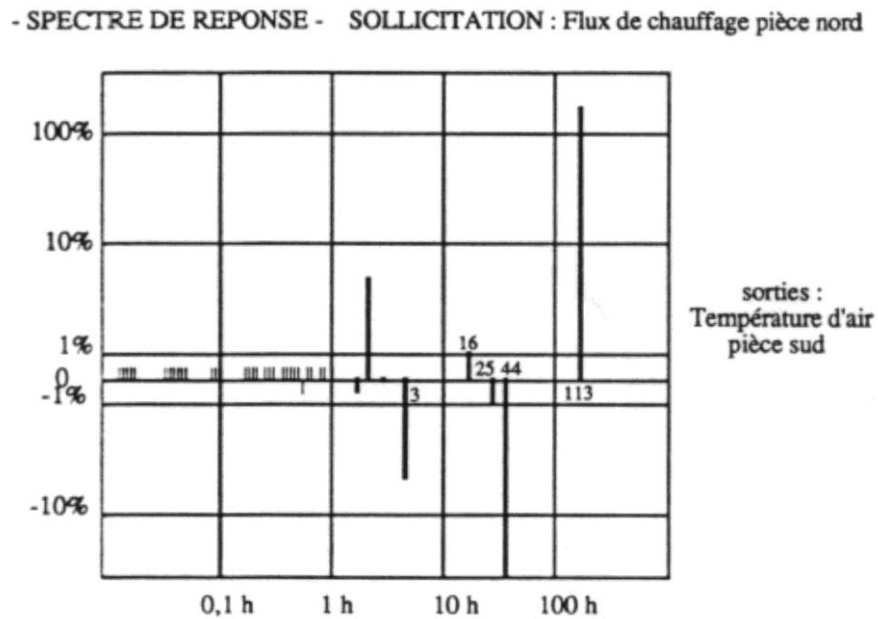


Figure 38: Exemple de spectrogramme [Bacot 88]

Ces spectrogrammes, établis pour une sollicitation sous forme d'échelon donnée (créneau de température, de flux entrant, ...) permettent de comprendre l'influence d'une sollicitation sur les différents modes et font l'objet d'interprétations spécifiques (signe des raies, alternance de raies, ...).

### 3.2. Réduction modale :

Après classement des valeurs propres, la réduction modale conduit alors à ne conserver qu'un nombre limité des valeurs propres. Le système d'équations à résoudre est alors d'une dimension nettement inférieure à la dimension du vecteur d'état, sans réduction notable de la précision obtenue. Nous y reviendrons au IV) 2), dans le cas d'une application spécifique.

### 3.3. Synthèse modale :

La synthèse modale vise à appliquer localement la réduction modale et à reconstituer par couplage le fonctionnement global du système étudié [Blanc Sommereux 91], [EDF 96]. Le principe est basé sur le constat que l'analyse modale conduit au calcul des valeurs propres de grands systèmes et qu'il est numériquement plus judicieux de sous structurer le système de

départ en systèmes élémentaires réduits indépendamment et couplés par la suite [Roux 93]. Ainsi, un problème complexe est découpé en problèmes plus simples et le comportement local des sous éléments (zones thermiques, parois, ...) est combiné pour former le comportement d'ensemble. Lors de l'assemblage, différents modes de couplage doivent être traités (contact, recouvrement, ...). Un problème sensiblement similaire à cet assemblage de modèle réduits a été résolu lors du couplage des zones thermiques au sein de *CODYRUN*, résolu par recouvrement [Boyer 93].

#### **4. LIMITATIONS ET AMENAGEMENTS POUR CODYRUN :**

Les premiers développements présentés au paragraphe suivant ont été conduits sous *MATLAB*, avec pour objectif l'intégration ultérieure à *CODYRUN*. Ils ont en particulier mis en évidence des modifications à apporter à modèle thermique pour satisfaire à certaines propriétés :

##### **4.1. Thermo-aéraulique et stationnarité.**

Dans un cas monozone, le problème thermo-aéraulique couplé conduit à un système d'équations non linéaires permettant de résoudre en une passe les températures et les débits. En marge des difficultés numériques liées à un tel schéma, il ne correspond pas à la démarche choisie à l'origine, en raison de notre cahier des charges multi-modèle. Guidés de plus par la présence simultanée au sein de *CODYRUN* d'aspects de recherche et d'aide à la conception, nous nous sommes orientés vers un couplage des phénomènes thermiques et aérauliques à l'aide d'un schéma itératif.

Le multizonage conduit à un système linéaire de grande dimension, qui en présence de transferts aérauliques variant dans le temps est toujours instationnaire. En effet, la matrice *A* (qui fait partie de l'équation matricielle d'état) traduisant les échanges d'énergie dans le système étudié et donc entre les pièces, dépend alors du temps.

Le formalisme d'état est ainsi le plus souvent limité à l'aspect thermique du problème. Une approche originale centrée sur le problème aéraulique (sans thermique), limitée dans ses applications (en raison d'une linéarisation locale du système en pression), a été présentée par [Passard 89] et propose, à l'aide de l'analyse modale, une interprétation physique des modes propres aérauliques.

Au sein d'un bâtiment, en plus de l'instationnarité, le calcul détaillé des débits introduit des non linéarités et exclut donc le problème du champ des méthodes abordées dans ce chapitre.

Les éléments précédents plaident alors dans le sens d'un couplage thermo-aéraulique itératif. En effet, en vue de l'intégration à *CODYRUN* de réduction modale, la stationnarité est une propriété importante, car les calculs intermédiaires faits alors - valeurs propres, ...- restent valables pour toute la simulation (Dans le cas contraire, ils sont à reconduire à chaque pas de temps, ce qui fait perdre l'intérêt gain de temps calcul).

En conclusion, la stationnarité n'est conservable qu'au niveau d'une zone thermique, sans prise en compte de l'aéraulique avec des débits variables, ce qui limite considérablement le champ d'application.

#### **4.2. Le choix des variables de sollicitations radiatives extérieures**

Pour ce dernier point, la stationnarité nécessite aussi l'invariance de B (matrice d'application de la commande ou des sollicitations, i.e.  $U$ ), en particulier au niveau de la prise en compte des flux radiatifs de courtes longueur d'onde. Le choix habituel des variables météorologiques de rayonnement, à savoir direct et diffus horizontal ( $D_h$  et  $d_h$ ), ne permet pas de respecter la contrainte précédente. Pour y parvenir, les données de sollicitations doivent être pré-traitées pour en extraire des variables intermédiaires, à savoir les densités de flux global incidentes sur les quatre directions cardinales (en prenant aussi en compte le rayonnement réfléchi par l'environnement du bâtiment). A ce moment, la stationnarité est conservée. C'est pour ne pas l'avoir compris au moment du développement initial (1991) du noyau de calcul de *CODYRUN* que le système d'état qui est mis en jeu est dégénéré, dans la mesure où l'équation d'évolution d'état qui est employée est du type  $C\dot{T} = AT + B$ , B étant alors un vecteur à reconstruire à chaque pas de temps et non pas  $C\dot{T} = AT + BU$ . La référence [Boyer 96] (en annexe) détaille la constitution de cette équation au sein du code.

#### **4.3. Nécessité de l'écriture de bilans de flux :**

Par ailleurs, au sein du modèle thermique de *CODYRUN*, le choix a été fait d'écrire des bilans de densités de flux pour les nœuds de parois opaques et de vitrages, et des bilans de flux pour l'équilibre thermoconvectif du nœud d'air. Pour que la matrice A soit symétrique en

cas de réciprocity, il est nécessaire d'écrire des bilans de flux pour tous les nœuds.

#### **4.4. Le traitement des échanges radiatifs intérieurs :**

Un autre problème nous est apparu lors de cette étude est celui du passage de la forme  $C\dot{T} = AT + BU$  à  $\dot{X} = A'X + B'U$ , car la matrice  $C$  n'est pas inversible, du moins de par le mode de construction du système thermique. En effet, l'avant dernière ligne de l'équation d'évolution thermique est celle du bilan radiatif de température radiante moyenne ( $T_{rm}$ ). Ce nœud ne présentant pas d'inertie, la ligne correspondante dans  $C$  est nulle. Il nous a donc fallu extraire cette ligne de bilan du système d'état à résoudre. Pour ce faire, au lieu d'exprimer les flux en fonction d'un nœud central de température moyenne, les flux ont alors été exprimés directement de nœud intérieur à nœud intérieur. En faisant l'analogie avec les réseaux électriques, cette transformation revient à une transformation du type étoile triangle (dans la configuration étoile, le rôle du point milieu est joué par  $T_{rm}$ ).

#### **4.5. Prise en compte de l'inertie des vitrages**

Pour englober les vitrages à notre étude, de manière à ne pas avoir le même problème qu'avec le nœud de température radiante moyenne, la capacité thermique des nœuds de températures de surface des vitrages a été considérée, contrairement à l'usage en thermique des bâtiments.

Notons enfin lors des calculs intermédiaires l'utilisation de la matrice  $C^{-1/2}AC^{-1/2}$  à la place de  $C^{-1}A$ , la première possédant les mêmes valeurs propres que la seconde, avec cependant l'avantage d'être symétrique (auquel cas il est possible d'utiliser des algorithmes performants pour le calcul des valeurs propres [Moktari 89]).

### **5. APPLICATION DE LA REDUCTION MODALE :**

En raison des progrès rapides réalisés dans les moyens et outils de calcul, les chercheurs de beaucoup de disciplines sont de plus en plus amenés à traiter des systèmes de grande dimension. Ces derniers sont d'une part difficiles à manipuler et posent de nombreux problèmes numériques. L'intérêt de réduire la taille de ces systèmes est donc primordial.

=====

[Menezo 98] évoque deux voies pour l'obtention d'un mode réduit, l'une basée sur l'identification au départ d'un ordre choisi ou l'autre sur l'application de techniques de réduction à un modèle de connaissance d'ordre élevé. Ayant choisi cette seconde voie, pour des systèmes linéaires, deux classes de méthodes sont rencontrées, fréquentielles ([Rachid 97]) et temporelles. Nous nous intéressons plus particulièrement à ces dernières, en centrant notre propos sur les résultats obtenus et les perspectives d'intégration à *CODYRUN*, le lecteur intéressé pouvant trouver par ailleurs les développements mathématiques associés ([Roux 93], [Moktari 88]).

Les méthodes temporelles sont le plus souvent tirées de la diagonalisation et d'une partition des modes. Il est alors possible de négliger la partie rapide ou plus communément la dynamique de cette partie [Marshall 66]. C'est cette dernière approche que nous exposerons plus en détail plus avant. D'autres méthodes sont rencontrées et listées dans la référence [Moktari 88].

Une application sous *MATLAB* dédiée à la cellule expérimentale LGI (présentée au chapitre I) a été conduite initialement dans le cadre d'un stage de Maîtrise et améliorée par la suite par différents membres de l'équipe. Avec les hypothèses de linéarité des échanges, le choix des variables cardinales pour les sollicitations radiatifs, les points particuliers concernant les échanges radiatifs intérieurs de grande longueur d'onde ainsi la prise en compte de l'inertie des vitrages, un modèle d'état de la cellule peut être aisément établi. Les points de détail relatifs à la répartition intérieure du rayonnement solaire intérieur et les transferts avec le sol sont traités de manière classique. Dans le cas de l'intégration de modèles conductifs simples au sein des parois opaques (R2C, i.e. 2 nœuds surfaciques, sur lesquels l'inertie est distribuée et séparés par la résistance thermique de la paroi [Brau 92]), ce système est de dimension 18. Sa résolution par différences finies sur une séquence météorologique d'une semaine et sa confrontation avec *CODYRUN* et des mesures expérimentales font état d'une très bonne correspondance des résultats.

Vis à vis de la réduction modale, un critère très simple a été adopté, visant après diagonalisation du système à résoudre, à classer les modes en modes lents ou rapides, selon la position de leur constantes de temps ( $\tau = -1/\lambda$ ) associées par rapport à  $dt/4$ ,  $dt$  étant le pas de temps [Marshall 66]. Cette partition des composantes du vecteur d'état permet d'obtenir les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} U \quad \text{et} \quad Y = [H_1 \quad H_2] \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}$$

$W_1$  étant le bloc des valeurs propres caractérisant la partie lente du système,  $W_2$  celle rapide. La réduction avec le critère choisi revient à ne conserver dans l'équation d'évolution que l'évolution lente, en faisant l'hypothèse que  $\dot{X}_2 = 0$  (on néglige la dynamique de la partie lente).

L'estimateur d'état réduit est alors constitué par le système d'équations suivant

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = [W_1]X_1 + [G_1]U \\ Y = [H_1]X_1 + (-H_2W_2^{-1}G_2)U \end{cases}$$

Pour conserver les caractéristiques de la réponse en régime permanent, un couplage direct (au moyen d'un gain  $K$  est ajouté au terme liant  $Y$  et  $U$ ). Le détail du calcul est donné dans la réf. [Cools 89]

Cette démarche nous a conduit pour le pas de temps considéré (1 h) à ne conserver que sept modes principaux pour la cellule. Un estimateur réduit d'ordre 7 est donc obtenu et les 11 (18-7) autres températures peuvent être estimées à l'aide de la nouvelle équation d'observation. Des comparaisons probantes des résultats des modèles complet et réduit, tant au niveau des températures sèches d'air que celles de surfaces sont telles que celle ci-dessous :

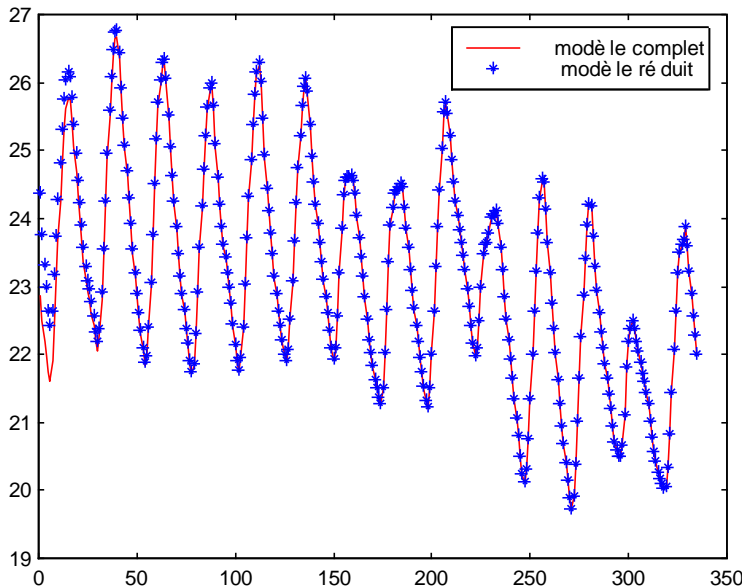


Figure 39 : Comparaison des températures sèches d'air intérieur, modèles complet et réduits

L'écart visible la première journée est dû à des valeurs de températures initiales volontairement différentes. Exprimées en heures, les constantes de temps des différents modes sont les suivants : (0.0348, 0.0562, 0.0854, **10.2178**, **101.419**, 0.9982, 0.1875, 0.2342, 0.2272, 0.3592, 0.2052, 0.3596, 0.2051, 0.2051, 0.3596, 0.3596, 0.2051)

Par rapport à  $dt/4$  (15mn = 0.25h), nous retrouvons les 7 modes évoqués précédemment. Les figures suivantes tracent les thermogrammes des deux modes principaux.

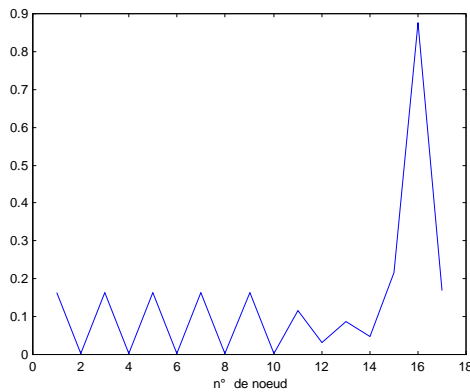


Figure 40 : Thermogramme mode 4

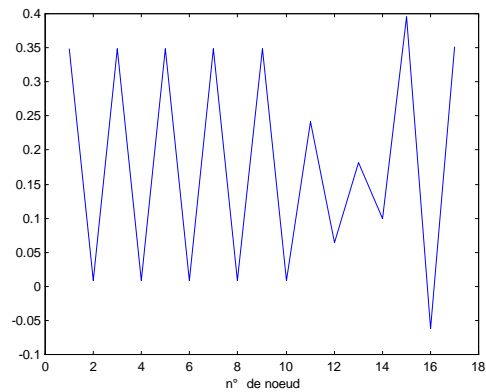


Figure 41 : Thermogramme mode 5

Nous rappelons que ces figures comportent en abscisse les différents nœuds de discrétisation de la cellule et que l'ordonnée est représentative d'une température. Compte tenu de la numérotation adoptée, le nœud 16 est celui de surface intérieure (à la zone) de la paroi plancher, les noeuds de numéros impairs étant ceux de surface intérieure des parois. Le mode 5 est un mode correspondant au stockage d'énergie dans le nœud de plancher (dalle béton), alors que le 4 est celui du stockage d'énergie dans la face intérieure (fibrociment) des parois ainsi que dans l'air intérieur. Ces deux modes étant de loin ceux principaux, l'analyse modale nous indique que pratiquement toute la dynamique de la cellule est expliquée par ces modes. Par rapport au thermogramme présenté fig. 37, les courbes précédentes ont une forme en dents de scie. Ceci est lié au modèle conductif R2C utilisé dans chacune des parois. La méthode fonctionne donc correctement dans le cas traité et plus généralement, dans le cas de systèmes où une partition nette des constantes de temps est observée (leur valeur dans notre cas a été indiquée précédemment). D'autres méthodes, faisant par exemple intervenir les notions de commandabilité et d'observabilité des modes sont applicables indépendamment de cette restriction.

En conclusion, cette application à l'état de prototype a permis d'identifier les problèmes liés à la mise en œuvre de la réduction modale et de confirmer l'intérêt de



l'intégration au sein d'un code multizone tel que le nôtre. Pour mémoire, au sein de nos premiers travaux (thèse), nous avons souligné la taille des systèmes thermiques mis en jeu et identifié des possibilités d'amélioration par maillage grossier des parois de moindre importance (tirant parti de l'aspect multimodèle). Les méthodes évoquées précédemment apportent des solutions bien meilleures et surtout mathématiquement plus rigoureuses.

## 6. PERSPECTIVES DE RECHERCHE A COURT ET PLUS LONG TERME :

### 6.1. Analyse de sensibilité et système d'état :

Nos travaux dans le cadre de la validation nous ayant menés à nous intéresser à l'analyse de sensibilité et d'incertitude, nous nous sommes tout d'abord tournés vers des méthodes statistiques (voir Chapitre II). Cependant, pour les systèmes d'état, nous n'avons pas identifié dans la bibliographie de méthodes spécifiques à cette importante classe de systèmes. Les développements ci-après abordent l'analyse de sensibilité paramétrique, puis celle non paramétrique. Nous conserverons à l'esprit notre domaine d'application, ainsi que les hypothèses associées (linéarisation des échanges en particulier).

#### 6.1.1. Analyse non paramétrique :

Dans chacun des deux cas, nous centrerons notre propos sur l'équation d'évolution d'état, celle d'observation (et donc des sorties) se déduisant de la connaissance de l'état par une simple multiplication matricielle. Le problème peut se résumer ainsi : *étant donné une fluctuation  $dU$  (ou incertitude) sur le vecteur des commandes, quelle est sa conséquence  $dX$  au niveau de l'état ?*

Avec les notations habituelles et l'hypothèse qu'en présence de ces perturbations l'équation d'évolution d'état est toujours vérifiée, nous avons alors :

$$\dot{X} + d\dot{X} = A(X + dX) + B(U + dU)$$

conduisant à  $d\dot{X} = AdX + BdU$

La résolution par différences finies implicites du système précédent conduit à une

équation récurrente, à savoir  $[\frac{Id}{\Delta t} - A] dX_n = \frac{Id}{\Delta t} dX_{n-1} + B dU_n$ ,  $\Delta t$  étant le pas de temps.

L'incertitude sur les commandes étant une constante, cette équation se ramène à

$$dX_n = [M^{-1}N] dX_0 + [Id + (M^{-1}N) + (M^{-1}N)^2 + \dots + (M^{-1}N)^{n-1}] M^{-1}B dU$$

avec  $M = [\frac{Id}{\Delta t} - A]$  et  $N = \frac{Id}{\Delta t}$

Le premier terme exprime la propagation dans le modèle de l'erreur existante à l'instant  $t = 0$ , Pour  $n \rightarrow \infty$ , c'est à dire loin de l'instant de départ, on a

$$dX \rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} (M^{-1}N)^n + \frac{Id - \lim_{n \rightarrow \infty} (M^{-1}N)^n}{Id - M^{-1}N}$$

Pour évaluer la limite intervenant au niveau des deux termes, soit  $T$  la matrice passage dans la base modale du système initial, on a donc  $A = TDT^{-1}$ ,  $D$  étant la matrice diagonale présentant les valeurs propres du système de départ. Les précautions initiales (échanges de grande longueur d'onde intérieurs et vitrages) nous assurent de l'existence de cette forme car  $A$  est alors régulière.

On a  $(M^{-1}N)^n = [T^{-1}(\frac{Id}{\Delta t} - D)^{-1}T \frac{Id}{\Delta t}]^n = T^n (Id - D\Delta t)^{-n} T^{-n}$

Les éléments de cette matrice diagonale sont égaux à  $1 - \frac{\lambda_i}{\Delta t}$  et sont supérieurs à l'unité (car les  $\lambda_i$  sont négatifs, en raison de la stabilité intrinsèque du système de départ). L'élévation à la puissance  $-n$  assure alors la convergence alors vers 0.

En définitive, on obtient  $dX = (Id - M^{-1}N)^{-1} \frac{Id}{\Delta t} B dU = -A^{-1}B dU$  (\*)

Il est à noter que dans le cas où le système d'état est mis sous sa forme compagne de commande, l'expression de  $dX$  se simplifie encore.

*Remarque* : Au départ de l'équation d'évolution d'état de  $dX$ , il est possible de retrouver immédiatement (\*). En effet, l'hypothèse  $dU$  constant et système asymptotiquement stable conduit à étudier la dynamique d'un système d'état stable sollicité par une commande constante. La réponse en régime permanent s'obtient en annulant la dérivée de  $dX$ , ce qui conduit directement à  $dX = -A^{-1}B dU$ .

Pour l'analyse de sensibilité non paramétrique, une expression particulièrement simple de la sensibilité est ainsi obtenue. Cette méthode a le mérite, pour un système stationnaire de ne pas dépendre du pas de temps considéré et de permettre l'analyse de sensibilité

différentielle (DSA), dans la mesure où les coefficients de sensibilités par rapport aux paramètres s'obtiennent algébriquement. A ce moment, compte tenu de l'hypothèse de linéarité de notre modèle, l'analyse d'incertitude est aussi accessible (sans recourir à la méthode statistique qui demande un nombre de simulations de l'ordre de la centaine). Il est à noter que dans le cas instationnaire (par exemple de par la prise en compte de l'aérodynamique), il suffit de recalculer  $-A^{-1}BdU$  à chaque pas de temps. L'intérêt pratique en phase de conception est celui de quantifier immédiatement les coefficients de sensibilité de l'enveloppe aux sollicitations météorologiques, du moins pour celles dont les effets sont intégrés de façon linéaire. Par exemple, dans le cas d'un modèle du type  $h_{ce} = aV^n + b$  pour les coefficients d'échange convectifs extérieurs ( $V$  étant la vitesse du vent) ou d'une non linéarisation des échanges radiatifs extérieurs, la méthode statistique pour l'analyse d'incertitude est la seule applicable. Des comparaisons entre les deux méthodes (algébrique et statistique) sont en cours au sein de l'application *MATLAB* dédiée à la cellule.

### 6.1.2. Analyse paramétrique :

Dans le cas traité, la matrice  $A$  est remplacée dans l'équation d'évolution d'état par  $A+dA$ . En raison de la constitution de cette matrice dans notre domaine et des modèles que nous avons choisis (les termes sont du type  $\lambda/e, h_{ci}, h_{ri}$ , [Boyer 96]), cette matrice  $dA$  convient bien pour tous les cas dans lesquels elle s'exprime de manière linéaire en fonction du paramètre structural du modèle qui est analysé. Par exemple, cette approche se prête bien à l'étude de la sensibilité paramétrique du modèle à la conductivité thermique de matériaux (alors  $dA = d\lambda/e$ ), aux coefficients d'échanges superficiels, mais pas à l'épaisseur  $e$ .

Avec ces restrictions, avec la même démarche qu'au paragraphe précédent, une relation du type  $dX_{n+1} = \alpha dX_n + \beta X_{n+1}$ , faisant apparaître l'état et nécessitant donc un calcul à chaque pas de temps,  $\alpha$  et  $\beta$  étant des matrices (constantes d'un pas de temps sur l'autre) faisant intervenir  $A, dA$  et le pas de temps.

En conclusion, les approches algébriques conduites pour l'analyse de sensibilité (et de manière induite celle de l'incertitude) sont assez simples, en particulier pour celle non paramétrique. Cette méthode directe permet, dans le cas d'un système thermique, d'éviter le recours aux méthodes statistiques.

En liaison avec le paragraphe précédent (analyse et réduction modale), dans le cas de

l'analyse paramétrique, certains points méritent des approfondissements, tels que le lien analyse modale/analyse de sensibilité ou la question de la conservation des coefficients de sensibilité et de l'incertitude associée lors de la réduction du modèle.

## 6.2. Application de la théorie des observateurs à la mesure :

L'origine de cette notion se trouve dans la nécessité de l'estimation de certaines composantes du vecteur d'état lors de la commande (d'état) des systèmes. Au rang des perspectives court et moyen terme, nous évoquerons dans cette partie une utilisation détournée des observateurs, spécifique à la mesure de températures en thermique des bâtiments.

### 6.2.1. Introduction aux observateurs pour les besoins de la compensation

La compensation ou correction (au sens de l'automatique) a pour objet de conférer au système considéré des propriétés plus intéressantes en matière de stabilité, précision ou rapidité. Pour un système connu sous forme d'état, ses caractéristiques sont fixées par les pôles de la matrice de transfert associée. Si ce système est monovariable, cette matrice se ramène à une fonction de transfert telle que  $\frac{Y(p)}{U(p)} = C(pId - A)^{-1}B$ ,  $p$  désignant la variable de Laplace. Nous allons voir que la compensation d'état, illustrée par le schéma fonctionnel suivant, se ramène à une modification de la matrice d'évolution et donc des modes du systèmes.

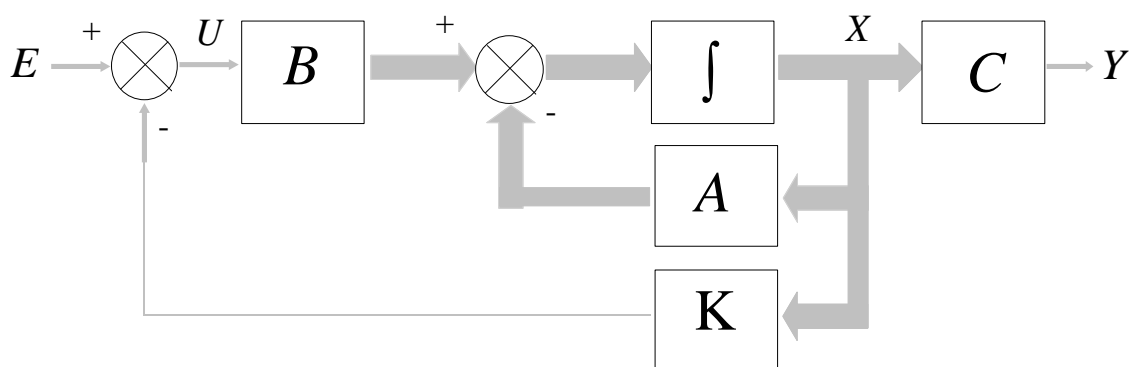


Figure 42 : Schéma fonctionnel d'un système d'état en présence d'un retour

L'équation de la commande,  $U = E - K X$ , associée à celle décrivant le système d'état conduit à une nouvelle équation d'évolution du système bouclé, à savoir

$\dot{X} = (A - BK)X + BE$ . Pour le nouveau système d'état obtenu, les propriétés vont être différentes (de celles de celui non compensé) dans la mesure où la matrice d'évolution est modifiée.

La mise en place de la commande consiste principalement en un choix judicieux de la matrice  $K$  (la matrice de retour), de manière à conférer au système les pôles désirés (placement de pôles). La forme compagne de commande du système à compenser est alors mise à profit pour exprimer simplement les termes de  $K$  en fonction des pôles initiaux et de ceux après compensation [Babary 91]. Cette commande nécessite cependant la mise à disposition de l'état, qui par sa définition même est constitué de variables internes au système et ne sont en particulier pas toujours accessibles (ce pour des raisons physiques ou simplement de coût). La notion d'observateur a été introduite pour cette raison.

### 6.2.2. Les différents types d'observateurs :

L'existence d'un observateur est conditionné par l'observabilité du système, évaluée à l'aide des critères mathématiques classiques. Au départ des notation habituelles, soit  $\hat{X}$  et  $\hat{Y}$  les estimés de l'état et de la sortie. L'estimateur d'état est recherché sous la forme  $\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + G(Y - \hat{Y})$  et  $\hat{Y} = C\hat{X}$ . Il répond ainsi à

$$\dot{\hat{X}} = (A - GC)\hat{X} + BU + GY$$

La construction de l'observateur nécessite le choix de la matrice  $G$  devant satisfaire les contraintes suivantes :

- $(A - GC)$  doit posséder des valeurs propres à partie réelle négative pour assurer la stabilité de l'estimateur
- L'estimateur doit posséder une dynamique plus rapide que celle du système à observer. Les règles de l'usage imposent une réponse transitoire 3 à 5 fois plus rapide celles du système de départ.

L'observateur présenté précédemment est dit complet dans la mesure où la dimension de l'observateur et celle du système sont égales. Dans la réalisation d'une régulation (ou commande), il existe toujours au moins une variable mesurée (température de reprise dans le cas d'un système de traitement d'air par exemple). En revenant à notre propos qui est celui de l'utilisation de l'observateur pour l'estimation de variables non mesurées dans le bâtiment, les

campagnes expérimentales permettent classiquement de disposer d'un nombre de températures assez important (températures sèches d'air et radiantes moyennes, surfaciques, ...). Pour ces variables, l'estimation n'est pas nécessaire (car la mesure est d'une part disponible et d'autre part meilleure que l'estimation que l'on pourrait en faire), permettant ainsi de réduire la taille du système d'état qui constitue l'observateur. L'estimateur est alors réduit. En partitionnant le vecteur d'état entre la partie à estimer  $X_e$  et celle mesurée  $X_n$ , il

$$\text{vient } X = \begin{pmatrix} X_e \\ X_n \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} \dot{X}_e \\ \dot{X}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ee} & A_{em} \\ A_{ne} & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_e \\ X_n \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_e \\ B_n \end{bmatrix} U$$

Avec la connaissance de  $X_n(t)$ , un observateur réduit est alors trouvé, répondant à une équation d'évolution similaire à celle du système complet, à savoir

$$\dot{\hat{X}}_e = (A_{ee} - G_e A_{ne}) \hat{X}_e + (A_{en} X_n + B_e U) + (G_e [\dot{X}_n - A_{nn} X_n - B_n U])$$

Cette équation nécessite cependant le calcul des dérivées de  $X_n(t)$ , ce qui peut poser problème, l'opération de différentiation s'accompagnant de l'amplification de tout bruit de haute fréquence présent dans le signal. Une variable intermédiaire  $\hat{X}_e^*$  est alors introduite, telle que

$$\hat{X}_e^* = \hat{X}_e - G_e X_n$$

En fonction de cette nouvelle variable, l'équation de l'observateur s'écrit

$$\dot{\hat{X}}_e^* = (A_{ee} - G_e A_{ne}) \hat{X}_e^* + (A_{en} - G_e A_{nn} + A_{ee} G_e - G_e A_{ne} G_e) X_n + (B_e - G_e B_n) U$$

### 6.2.3. Observateurs pour la mesure en thermique des bâtiments

Les observateurs d'état, détournés de leur utilisation d'origine à des fins d'estimation, constituent une méthode inverse [Javelas 95]. En effet, l'observateur porte aussi le nom de capteur logiciel. L'observateur est un système d'état [Babary 91] (pour lequel il est possible de construire de manière algorithmique les éléments constitutants, i.e. les matrices A, B, C, D). En lui présentant en entrée les sollicitations et les sorties mesurées d'une séquence particulière, il fournit en sortie une estimation des composantes observables du vecteur d'état.

Tout l'intérêt de l'observateur vu comme capteur logiciel réside dans la phrase précédente, étant donné qu'il est alors possible de manière indirecte de mesurer une grandeur difficilement accessible directement. Un exemple d'observateur utilisé dans ce sens est donné par [Scott Stephens 95], dans le cadre de l'estimation des pertes par effet joule dans le rotor

d'un moteur à paliers magnétiques. En l'absence de contact mécanique, compte tenu du mouvement du rotor, la mesure de la température du rotor est difficile. Un modèle thermique d'état du moteur est présenté, basé sur l'analyse nodale (i.e. modèle à capacités distribuées). Après s'être assuré de l'observabilité de la variable à mesurer, (c'est à dire de l'existence mathématique d'un observateur), un estimateur est ensuite construit permettant d'avoir accès à la température du rotor.

En partie guidé par cette publication, la question s'est alors posée de l'applicabilité de cette notion à notre domaine. La question était alors de savoir si des variables composantes du vecteur d'état faisaient l'objet d'une mesure directe impossible, difficile ou malaisée. Dans notre domaine, les variables pour lesquelles les hypothèses classiques conduisent à des systèmes d'état sont les températures et humidités absolues. Des applications potentielles sont les suivantes :

- une mesure indirecte de température de vitrage, pour lequel les propriétés des milieux semi-transparents (couplage avec le rayonnement en particulier) rendent impossible la mesure par contact [Javelas 95]. Cet aspect est apparu lors de l'instrumentation d'une pièce fortement exposée et dont une façade était entièrement vitrée (type immeuble de bureau). Du matériel (thermomètre IR) a été acquis et des expérimentations spécifiques seront réalisées pour valider cette démarche.
- Une mesure indirecte de température du sol sous un bâtiment existant. Les transferts avec le sol posant beaucoup de problèmes [Ambrose 81], [Trombe 89], [Krarti 96], des éléments peuvent être apportés grâce à cette technique. Dans l'optique d'une confrontation avec des mesures, nous avons évoqué au chapitre premier la cellule expérimentale *LGI*, pour laquelle l'instrumentation de températures de la dalle et sous dalle a été prévue.

La notion de capteur implique celle de la précision : En liaison avec le chapitre précédent, la sensibilité et incertitude du capteur ainsi construit seront accessibles.

*Remarque* : A chaque pas de temps, la résolution par différences finies du modèle d'état complet d'un bâtiment fournit la valeur du vecteur d'état (par exemple l'ensemble des températures du bâtiment). Quelle que soit la température (accessible ou non), une valeur est

donc fournie en sortie du modèle, que ce soit pour les températures de vitrages ou au niveau du sol. Cependant, cette valeur est une *pure* sortie de modèle et est donc entachée de toutes les erreurs associées (hypothèses simplificatrices, méthodes de résolution, ...). Dans le cas de l'estimation d'une de ces températures à l'aide d'un observateur réduit, certaines mesures effectuées sur des températures interviennent dans le processus de construction de l'estimation et amènent un supplément appréciable de précision.

### 6.3. Application de la réduction en régulation :

Cette partie terminale correspond à des perspectives à long terme. La détermination de lois de commande constitue une niche thématique intéressante, notre équipe rassemblant à la fois les compétences et le matériel nécessaires, tant en terme de modélisation, d'implantation d'algorithmes de commandes et de possibilité d'expérimentation sur nos supports.

En cas de climatisation active, le but de la régulation est de maintenir un climat intérieur acceptable, quelles que soient les perturbations extérieures. L'ambiance est observée le plus souvent au moyen d'une température que l'on cherche à maintenir à une certaine consigne. La commande est l'organe pilotant le système de climatisation, renseigné sur l'état de l'ambiance et les perturbations. A coté des lois très classiques (boucle fermée avec correcteur PI), les publications de ces dernières années font état d'un regain d'activité quand à l'utilisation de lois de commande performantes pour les systèmes de traitement d'air. C'est ainsi que de lois commande optimales [Braun 90], sous-optimales [Zaheer-Udin 92] ou encore basées sur les méthodes prédictives (ou MBPC) [Gonzales 96] sont rencontrées.

#### 6.3.1. Formulation modale du problème de régulation

La formulation modale permet, pour une consigne fixée, de trouver une loi de commande permettant d'affranchir théoriquement le système des sollicitations extérieures. Pour illustrer notre propos, considérons une enceinte de température intérieure  $T_i$ , chauffée par une puissance  $P$ , dans le but d'obtenir une consigne  $T_c$ .

Le comportement du système est représenté par les équations modales suivantes.

$$(I) \begin{cases} \dot{X} = A X + B P + B' U \\ T_i = C X \end{cases}, U \text{ représentant classiquement les perturbations}$$

L'objectif est alors de trouver la commande linéaire (en fonction de  $X$ ,  $T_c$  et  $U$ ) de la



forme  $P = T X + K T_c + M U$

tel que le système (enceinte et commande) ait un comportement indépendant des perturbations, c'est à dire tel que

$$\begin{cases} \dot{X} = N X + L T_c \\ T_i = C' X \end{cases}$$

La matrice  $N$  est celle des temps caractéristiques du système bouclé et est arbitrairement fixée. Tout comme l'observateur, elle est le résultat d'un compromis entre stabilité et vitesse de réaction. Ainsi que vu au paragraphe 6.2.1 de ce même chapitre (*Introduction aux observateurs pour les besoins de la commande*), ce type de commande modale revient à effectuer du placement de pôles. En reportant la loi de commande dans le système de départ, par identification, on obtient finalement

$$F = Q (A - N) ; M = -Q B' ; K = Q L ; Q = (B' B)^{-1} B'$$

$Q$  étant ainsi la matrice pseudo-inverse de  $B$

Une telle loi matricielle peut être implémentée dans une procédure et intégrée à un modèle tel que celui de la cellule LGI sur *MATLAB* ou encore au sein de *CODYRUN* pour évaluer les performances de la régulation ainsi réalisée.

### 6.3.2. Prise en compte de l'intermittence

Le type d'asservissement le plus répandu est celui de type Proportionnel Intégral (P.I.) et est impropre à intégrer un changement de consigne (entre jour et nuit par exemple), ce qui est un handicap pour optimiser un fonctionnement intermittent. Ce correcteur PI ne constitue en effet pas un modèle explicatif de comportement.

L'intermittence fait l'objet de nombreuses études dont les résultats ne sont pas simples à exploiter car les expériences acquises ne sont pas transposables, chaque cas étant spécifique (inertie, conditions d'exposition, type d'énergie et de système mis en jeu, ...) [Bloomfield 77], [Fulcheri 94].

Le modèle modal peut prévoir l'état du système à un horizon de plusieurs heures et ce avec une bonne précision. Par exemple, pendant un ralenti de nuit, on simule la relance avec le modèle, en supposant une évolution météorologique probable. Si la simulation indique que la consigne sera atteinte à l'heure désirée, la commande effective du système de climatisation est alors déclenchée. En raison de la disponibilité de régulateurs à microprocesseur, ce type de commande est tout à fait implantable industriellement.

En revenant à notre contexte, il est possible de trouver des applications qui nous paraissent intéressantes, faisant intervenir différents éléments existants, à savoir :

- la cellule expérimentale *LGI* et l'instrumentation associée
- le split system, modifié de manière à être commandé en boucle ouverte, i.e. indépendamment de sa régulation interne (il suffit de modifier électriquement le signal de consigne de manière à assurer la production de froid dès la mise sous tension de l'appareil)
- les modèles de split system basés sur les lois de régression
- le modèle *MATLAB* réduit de la cellule
- le modèle de génération automatique de séquences météorologiques [Adelard 98]



# *Conclusion*

Depuis l'éclosion de cette discipline spécifique qu'est celle de la thermique de bâtiments, beaucoup de chemin a été parcouru, balisé par beaucoup d'évènements tels que les avancées dans les méthodes d'étude des transferts de chaleur, l'apport de l'informatique et des outils numériques ou encore la prise en compte des contraintes environnementales. Dans cette mouvance, les codes adaptés, se situant entre ceux très détaillés et ceux simplifiés, se sont avérés être une voie intéressante et que nous avons empruntée. A une époque où les ressources de calcul croissent plus vite que ceux d'expérimentation, nous croyons au bénéfice d'aller-retour successifs entre expérimentation et modélisation.

Comme pour beaucoup d'autres disciplines, notre domaine est à une étape clé se caractérisant par l'abandon du paradigme analytique, tant vis à vis de la dichotomie des champs de connaissances disciplinaires que vis à vis des méthodes. En particulier, la thermique des bâtiments trouve dans ces domaines connexes des auxiliaires puissants lui permettant d'améliorer la qualité du service rendu à ce qui fait sa raison d'être, l'homme.

En plus des perspectives présentées, il en existe qui méritent d'être citées en conclusion : celle du couplage avec des modèles zonaux n'a pas été évoquée, dans la mesure où elle est basée sur la remise en question de l'hypothèse d'anisothermie des volumes d'air formés par chaque pièce, nécessitant alors une complète remise à plat de notre modélisation. Une autre voie très porteuse est celle de l'intégration de modèles de transports de polluants dans le bâtiment.

Enfin, nous évoquerons le nécessaire ancrage de notre activité dans le monde réel local. Loin d'être une fin en soi, ce travail se veut un prolongement des premières études entreprises il y a plus de dix ans sur la conception thermique des bâtiments à la Réunion et *j'espère par la même avoir apporté une modeste contribution au mieux être de mes concitoyens.*

*Bibliographie*



- [Abelard 99] **Abelard S.**  
Validation d'un code de calcul en thermique de bâtiments : Contribution de l'analyse temps fréquence, DEA Mécanique et Energétique, Université de la Réunion/INPL 1999. 73 p.
- [Adelard 98a] **Adelard L.**  
Classification climatique approfondie des régions réunionnaises. Mise en oeuvre d'un générateur de données climatiques cohérentes Thèse Université de la Réunion, Oct. 1998
- [Adelard 98b] **Adelard L., Pignolet Tardan F. , Lauret P., Mara T., Garde F. , Boyer H.**, Sky temperature modelling for thermal building application, Renewable Energy, 15 (1998), 418-430
- [Adelard 99] **Adelard L., Boyer H., Garde F., Gatina J.C.**  
A detailed weather data generator for building simulation  
Accepté à Energy and Buildings, Mars 1999
- [Alvarez 97] **Alvarez S., Coronel J.F., Balaras C.A., Dascalaki E.**  
Coupling and solving thermal and air flow phenomena in passively cooled buildings, Int. Journ. of Solar Energy, 19, pp. 59-80, (1997)
- [Ambrose 81] **Ambrose C.W.**  
Modelling losses from slab floors, Building and Environment, 16, 4, 251-258, 1981
- [Aude 98] **Aude P., Depecker P.**  
Perturbation of the Input Data of Models Used for the Prediction of Turbulent Air Flow in an Enclosure, Numerical Heat Transfer Part B, Vol. 34, Issue 2. pp. 139-16, 1998
- [Babary 91] **Babary J.P.**  
Polycopié de cours, ENSEIHT, Représentation d'état des systèmes linéaires continus, 1991
- [Bacot 84] **Bacot P., Neveu A., Sicard J.**  
Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, Revue Générale de Thermique, 1984, n°267. p.189-201
- [Bacot 85] **Bacot P., Bonfils R., Neveu A., Ribuot J.**  
Modélisation des systèmes thermiques complexes par la méthode de couplage. Revue Générale de Thermique, 1985, n°280. p.381-386
- [Bacot 88] **Bacot P.**  
Méthode modale, Energétique des bâtiments, Calcul des enveloppes, T2, Pyc Edition, p. 233-260, ISBN 2-85330-094-3
- [Baronnet 87] **Baronnet F.**  
Etude thermique de l'habitat individuel à la Réunion. Thèse : Sci. : Université de Paris VII, 1987. 182 p.
- [Bauman 83] **Bauman B., Andersson W.L., Carroll R., Kammerud N.E. Friedman,** 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 (1983)
- [Berges 86] **Berges, B.**  
Analyse du comportement conductif de l'enveloppe d'un bâtiment : recherche de modèles de transfert pour un flux monodimensionnel au travers des parois opaques. Thèse Université de Nice 1986. 296 p.
- 
-

- [Bettonvil 96] **Bettonvil B., Kleijnen J.P.C.**  
Searching for important factors in simulation models with many factors : séquentiel bifurcation, European Journal of Operational research, 96, 188-194, 1996.
- [Blanc Sommereux 91] **Blanc Sommereux I.**  
Etude du couplage dynamique de composants du bâtiment par synthèse modale. Thèse Ecole des Mines de Paris, 1991. 210 p.
- [Bloomfield 77] **Bloomfield D.P.**  
The optimisation of intermittent heating, Building and Environment, Vol. 12, 43-55, 1996
- [Bloomfield 95] **Bloomfield D.P., Candau Y., Dalicieux P., Delille S., Hammond S., Lomas K.J., Martin C. Parand, F. Patronis, J. Ramdani, N.**  
New techniques for validating building energy simulation programs. Proceedings of Building Simulation '95, Madison, Wisconsin, USA, 1995, p.596-603.
- [Box 78] **Box G.R.P., W.G. Hunter W.G., Hunter J.S.**  
Statistics for experimenters, John Wiley, ISBN 0-471-09315-7, 1978
- [Boyer 93] **Boyer H.**  
Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles, Thèse INSA Lyon, 1993
- [Boyer 96] **Boyer H., Chabriat J.P., GrondinPerez B., Tourrand C., Brau J.,** Thermal building simulation and computer generation of nodal model, Building and Environment, Vol. 31, n° 3, 207-214, 1996
- [Boyer 98a] **Boyer H., Garde F., Gatina J.C., Brau J.**  
A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes, Energy and Buildings, 28 (1998), 1, pp. 71-79
- [Boyer 98b] **Bilan scientifique 1998 équipe Génie Civil**  
Laboratoire de Génie Industriel, Université de la Réunion
- [Boyer 99] **Boyer H., Lauret P., Adelard A., Mara T.A.**  
Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation, Energy and Buildings, 29 (1999), 283-292
- [Brau 80] **Brau, J.**  
Modélisation thermique des bâtiments. Validation des modèles de calcul par une étude expérimentale en ambiance climatique simulée. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1980. 295 p.
- [Brau 87] **Brau J., Roux J.J., Depecker P., Croizier J., Gaignou A., Finas R.** Micro-informatique et comportement thermique des bâtiments en régime dynamique : CODYBA. Génie Climatique, 1987, n°11. p. 15-23.
- [Brau 92] **Brau, J., Roux, J.J., Krauss G.** Cahier des algorithmes du logiciel CODYBA. Paris : AFME, 1992. p. 59.
- [Braun 90] **Braun J.E.**  
Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, ASHRAE Transactions, 92, 2, 1990
-



- [Ca 95] **Ca V.T., Asaeda T., Ito M.**  
Characteristics of wind field in a street canyon, Journal of Wind Engineering and Aerodynamics, 57, 63-80, 1995.
- [Calogine 97] **Calogine D.**  
Etude et réalisation d'un capteur de mesure de température équivalente de ciel, DEA Mécanique et Energétique, Université de la Réunion/INPL, 1997. 114 p.
- [Clarke 85] **Clarke, J. A.**  
Energy simulation in building design. Glasgow (U.K.) : Adam Hilger Ltd, 1985. 383 p. ISBN 0-85274-797-7
- [Cools 89] **Cools C.**  
Identification of building reduced models. Application to the caractérisation of passive solar buildings, Int. J. Solar Energy, 1989, vol. 7, pp 127-158.
- [Dalibor Vytacil 93] **Dalibor Vytacil, Pet Moos**  
The sensibility analysis of building thermal network elements, Building and Environment, Vol. 28, 1, pp. 63-68, 1993
- [Delille 96] **Delille S., Guyon G., Ramdani N.**  
Dossier de validation expérimentale de CLIM2000, fiche 11 ; Note EDF-DER HE-14/96/003
- [Depecker 92] **Depecker P., Draoui A., Beghein C.**  
Propagation du bruit des erreurs expérimentales dans les modèles théoriques gérés par des systèmes linéaires. Deux applications en transfert thermique. Journal de Physique III, 2, 1992. p. 79-98.
- [EDF- DER 96] Note interne EDF/DER, 96NM000, La synthèse modale – état de l'art et application à l'aéraulique des bâtiments
- [El Khoury 89] **El Khoury**  
Analyse modale des systèmes thermiques en présence de transferts non réciproques, International Journal of Heat and Mass Transfer, 32, 2, 213-226, 1989
- Feustel 99 **Feustel H.E.**  
COMIS – an international multizone air-flow and contaminant transport model, Energy and Buildings, 30, 105-115, 1999,
- [Frank 78] **Franck P. M.**  
Introduction to system sensitivity theory, Academic Press, 1978
- [Fulcheri 94] **Fulcheri L., Neirac F.P., Le Mouel A., Fabron C.**  
Chauffage des bâtiments, intermittenace et lois de régulation en boucle ouverte, Revue Générale de Thermique, n° 387, Mars 1994.
- [Fürbringer 93] **Fürbringer J.M., Borchiellini R.**  
Technique of sensibility analysis applied to an air infiltration multizone model, ASHRAE Transactions, Symposia, DE-93-7-1, 1993
- [Fürbringer 96] **Fürbringer J.M.**  
Sensitivity analysis for modellers, Air Infiltration Review, vol. 17, n°4, Sept. 1996.
- [Fürbringer 99] **Fürbringer J.M.**  
Confidence of simulation results : put a sensitivity analysis module in your model ; The IEA-ECBS Annex 23 experience of model
-

- [Garde 97a] evaluation, *Energy and Buildings*, 30, 61-71, 1999  
**Garde F.**  
Validation de modèle en thermique de l'habitat et intégration détaillée des systèmes de traitement d'air dans un code de calcul multizone et multimodèle, Thèse Université de la Réunion, Juillet 1997
- [Garde 97b] **Garde F., Boyer H., Pignolet-Tardan F., Lucas F., Brau J.**  
Multiple model approach and experimental validation of a residential air-to-air heat pump, CLIMA 2000, Bruxelles, Août 1997
- [Garde 97c] **Garde F., Adelard L., Boyer H., Célaire R.**  
Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings, CLIMA 2000, Bruxelles, Août 1997
- [Garde 98] **Garde F., Boyer H., Gatina J.C.**  
Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings, *Building and Environment*, 34 (1998), 1, pp. 71-84
- [Gatina 79] **Gatina J.C., Hervé P.**  
Introduction à la métrologie solaire dans l'île de la Réunion, Université Française de l'Océan Indien, 1979, 49 p.
- [Gatina 84] **Gatina J.C., Hervé P., Auffret P.Y.**  
Habitat et Climat à la Réunion. Construire en pays tropical humide. Documents et recherche n°11. Saint-Denis de la Réunion : Fondation pour la Recherche et le Développement dans l'Océan Indien, 1984, 159 p.
- [Georgakis 95] **Georgakis C.**  
Modern tools of process control : the case of black, grey & white models, *Entropie*, n° 194, 34-47, 1995
- [Gille 84] **Gille, J.C., Clique, J.M.**  
Systèmes linéaires et équations d'état. Paris : Eyrolles, 1984. 186p.
- [Girault 95] **Girault P., Delille S.**  
Description des cellules ETNA, configuration matérielle et géométrique, Note EDF-DER HE-14/93/003
- [Gonzalez 96] **Gonzalez A, Leyris J.P.**  
Application of generalized predictive control in MIMO systems to greenhouse climate regulation, *International Journal of System Science*, 27, 1, 27-32, 1996
- [Haghighat 91] **Haghighat F., Rao J.**  
Computer aided building ventilation system design - a system-theoretic approach. *Energy and Buildings*, 1991, n°17. p.147-155
- [Heerlin 88] **Heerlin K.**  
MOVECOMP - a multizone infiltration and ventilation simulation program. *Air Infiltration Review*, 9, 3, (1988)
- [Hugot 87] **Hugot E.**  
La sucrerie de cannes, Lavoisier Technique et Documentation, 1987
- [Javelas 95] **Javelas R.**  
Mesure des températures de surface de matériaux semi-transparents Colloque interUniversitaire Franco-Québécois, 23-25 mai 1995 Sherbrooke, Canada.
- [Joubert 89] **Joubert P.H., Mathews E.H.**  
QuickTEMP, A thermal analysis program for designers of naturally ventilated buildings, *Building and Environment*, 24, 2, p. 155-162
- 
-

- (1989)
- [Judkoff 83] **Judkoff R., Wortman D., O'Doherty B., Burch J.**  
A methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations. Draft Report TR-254-1508, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, 1983. 204 p.
- [Judkoff 95] **Judkoff R.D., Neymark J.S.**  
A procedure for testing the ability of whome building energy simulation programs to thermally model the building fabric, Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of ASME, Feb. 1995, vol. 117, pp. 7-15
- [Judkoff 95] **Judkoff R.D., Neymark J. S.**  
A procedure for testing the ability of whole building energy simulation programs to thermally model the fabric, Journal of Solar Energy Engineering, Vol ; 117, pp. 7-15, 1995
- [Kafetzopoulos 95] **Kafetzopoulos M.G., Suen K.O.**  
Coupling of thermal and airflow calculation programs offering simultaneous thermal and airflow analysis, Building Serv. Eng. Res. Technol., 16, (1) 33-36 (1995)
- [Kleijnen 97] **Kleijnen J.P.C.**  
Sensitivity analysis and related analyses : a review of some statistical techniques, Journal of Statitics and Computers in Simulation, 57, 11-142, 1997.
- [Krarti 96] **Krarti M.**  
Effect of spatial variation variation of soil thermal properties on slab on ground heat transfer, Building and Environment, 31,1, 51-57, 1996
- [Lauret 98] **Lauret A.J.P.**  
Nouvelles approches de modélisation de la cristallisation en sucrerie de cannes : Propositions d'applications industrielles en vue de l'amélioration des performances du procédé, Thèse Université de la Réunion, Déc. 1998.
- [Lauret 99a] **Lauret A. P., Boyer H., Gatina J.C.**  
Hybrid modelling of the sucrose cristal growth rate, accepté à International Journal of Modelling and Simulation, Juillet 1999
- [Lauret 99b] **Lauret A. P., H. Boyer H., Gatina J.C.**  
Hybrid modelling of the sugar boiling process, accepté à Control Engineering Practice, Août 1999
- [Lefebvre 96] **Lefebvre G.**  
Modal-based simulation of the thermal behaviour of a building : the m2m software, Energy and Buildings, 25, (1997), 19-30.
- [Lomas 91] **Lomas K.J.**  
IEA task VIII Empirical validation : a critical appaisal, BRE, Reserch Report 3, 1991
- [Lomas 92] **K.J. Lomas, H. Eppel**  
Sensitivity analysis techniques for building simulation programs, Energy and Buildings, 19, 21-24, 1992
- [Lucas 96] **Lucas F.**  
Modélisation et validation expérimentale de systèmes de traitement d'air. DEA Mécanique et Energétique, Université de la Réunion/INPL, 1996. 112 p.
- 
-

- [Lucas 97]                   **Lucas F., Garde F., Boyer H.**  
Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de systèmes de traitement d'air, III<sup>ème</sup> colloque inter-universitaire Franco-Québécois, Toulouse, Mai 1997
- [Lucas 98]                   **Lucas F., Mara T., Garde F., Boyer H.**  
A comparaison between CODYRUN and TRNSYS, simulation codes for thermal building behaviour, *Renewable Energy*, 15 (1998), Part. II, 1624-1633
- [Mara 96]                   **Mara T.A.**  
Validation expérimentale d'un code de calcul thermique des bâtiments, DEA Mécanique et Energétique, Université de la Réunion/INPL, 1997. 91 p.
- [Mara 98]                   **Mara T.A., Adelard L., Lauret A. P., Garde F.**  
Présentation d'une application dédiée à la validation de codes de simulation thermique du bâtiment, I.B.P.S.A. '98, 10-11 Déc. 1998, Sophia Antipolis (France)
- [Mara 99]                   **Mara T., Boyer H., Garde F.**  
Parametric Sensitivity Analysis in Building Thermal Modelling using Spectral Analysis, a Test-cell Case Study. Sousmis à *International Journal of Solar Energy Engineering*
- [Martin 93]                  **Martin, C. J., Watson, D. M. J.**  
*Empirical validation of the model SERI-RES using data from test rooms.* *Building and Environment*, 1993, Vol. 28, No 2, p. 175-187.
- [Marshall 66]               **Marshall S.A.**  
An approximate method for reducing the order of linear systems new method for simplifying linear dynamic system, *Control*, 642-643, Dec. 1966
- [Martin 93]                  **Martin C. J., Watson D. M. J.**  
Empirical validation of the model SERI-RES using data from test rooms, *Building and Environment*, 1993, Vol. 28, No 2, p. 175-187.
- [Menezo 98]               **Menezo C.**  
Contribution à la modélisation du comportement thermique de bâtiments par couplage de modèles réduits, Thèse INSA Lyon, 1998
- [Mézino 85]               **Mezino J.**  
Etude du gisement solaire de l'île de la Réunion. Thèse : Sci. : Université Paris VI, 1985. 158 p.
- [Michailescu 79]           **Michailescu G.**  
Modélisation de grands systèmes linéaires par agrégation *RAIRO Automatique Systems Analysis and Control*, 13, 2, 1979, 159-170
- [Mitalas 67]               **Mitalas G.P., Stephenson D.G.**  
Room thermal factors, *ASHRAE Transactions*, 73, 1 (1967)
- [Mokhtari 88]              **Mokhtari, A. M.**  
Etude du comportement thermique des bâtiments en contact avec le sol par l'analyse modale. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988. 227 p.
- [Ness 59]                   **Ness A.J.**  
Solution of a thermal network on a digital computer, *Solar Energy*,
-

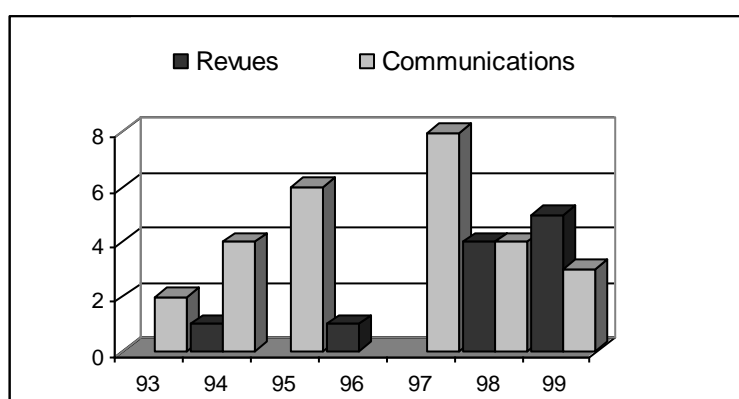
- 3, 1, 37-37 (1959)
- [Passard 90] **Passard J., Peube J.-L.**  
Modélisation des phénomènes aérauliques dans l'habitat et méthode de réduction. Revue de Physique Appliquée, 1990, n°25. p. 81-98.
- [Peuportier 90] **Peuportier B., Blanc Sommeureux I.**  
Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, Solar Energy, 8, 109-120 (1990)
- [Pignolet Tardan 96] **Pignolet Tardan F.**  
Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide : modélisation thermo aéraulique globale, Thèse INSA Lyon, Juillet 1996
- [Pignolet Tardan 97] **Pignolet Tardan F., Depecker F., J.C. Gatina**  
Modélisation du comportement thermique d'un espace urbain : calcul de la réponse en températures des structures et de l'air ambiant, Revue Générale de Thermique, 36, 534-546,1997
- [Press 88] **Press W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T.**  
Numerical Recipes in C. The art of scientific computing. Cambridge (U.K.) : Cambridge Univ. Press, 1988. 735 p. ISBN 0-521-354-X
- [Rabinstein 94] **Rabinstein R.**  
Application of model reduction techniques to building energy simulation, Solar Energy, **53**, 3, 289-299 (1994)
- [Rachid 97] **Rachid A.**  
Réalisation, réduction et comande des systèmes linéaires, Editions Technip, ISBN 2-7108-0734-3
- [Rahni 98b] **Rahni N.**  
Regression analysis and dynamic buildings energy models, proceedings of SAMO'98 at Venice, pp. 227 229, 1998
- [Rahni 98a] **Rahni N.**  
Validation de modèles et variabilité de paramètres, analyses de sensibilité et d'incertitude – procédures d'optimisation, application à des modèles en thermique des bâtiments, Thèse Université de Paris XII – Val de Marne, 1998.
- [Ramdani 94] **Ramdani, N.**  
Validation expérimentale et Analyse de Signaux : Développement d'une méthodologie de comparaison modèle/mesures en thermique du bâtiment. Thèse : Sci. : Université de Paris XII, 1994. 268 p.
- [Rao 93] **Rao J., Haghight F.**  
A procédure for sensitivity analysis of airflow in multizone buildings, Building and Environment, 28, 1, 53-62, 1993
- [Rongere 90] **Rongère F.X., Gautier B.**  
CLIM 2000 : un logiciel nouveau pour la modélisation énergétique en thermique du bâtiment, 1990, note EDF n° HE 12W 3026.
- [Roux 93] **Roux J.J.**  
Modélisation du comportement thermique et aéraulique des bâtiments : sous structuration, réduction et méthode de couplage  
Thèse d'habilitation INSA Lyon, Déc. 1993
- [Saulnier 81] **Saulnier J.B., Alexandre A., J. Martinet**  
L'utilisation des logiciels de modélisation en thermique, deux exemples d'application, Revue Générale de Thermique, 1981,
- 
-

- n°230. 97-109, 1981
- [Saulnier 85] **Saulnier J.B., Alexandre A.**  
La modélisation thermique par la méthode nodale : ses principes, ses succès et ses limites. Revue Générale de Thermique, 1985, n°280. p.363-372, 1985.
- [Schneider 95] **Schneider P., Roux J.J., Brau J.**  
Strategies for solving the airflow thermal problem in multiroom buildings, Building and Environment 30, 2, p. 277-286 (1995)
- [Scott Stephens 95] **Scott Stephens L, Knospe C.R.**  
Determination of power losses in High speed magnetic journal bearings using temperature measurements, Experimental Heat Transfer, 8, pp. 33-56, 1995
- [Simmonds 94] **Simmonds P.**  
Control strategies for combined heating and cooling radiant systems, ASHRAE Transactions, 94-13-4, 1031-1039, 1994
- [Soubdhan 99] **Soubdhan T.**  
Contribution à la validation expérimentale d'un code de calcul thermique de bâtiments : comparaisons interlogiciels, DEA Mécanique et Energétique, Univ. de la Réunion/INPL 1999, 76 p.
- [Tourrand 91] **Tourrand C.**  
Caractérisation des parois complexes utilisées dans l'habitat. Thèse Sci : Université de Paris VII, 1991. 265 p.
- [Tourrand 94] **Tourrand C., H. Boyer, Chabriat J.P.**  
Caractérisation thermique de parois de construction par des mesures en site réel, Revue Générale de Thermique, n° 387, mars 1994
- [TRNSYS 94] **TRNSYS, A Transient System Simulation Program , Solar Energy Laboratory, University of Winsconsin – Madison, 1994.**
- [Trombe 89] **Trombe A., Javelas R., Petit M.**  
Etude expérimentale, en site naturel, du comportement thermique d'une dalle de sol sur terre plein, Revue Générale de Thermique, n° 328, 244-249, Avril 1989
- [Vaxelaire 89] **Vaxelaire P.**  
Etude de la répartition spectrale du rayonnement solaire au sol à l'Ile de la Réunion, Thèse Université de Paris VII, 1989, 212 p.
- [Walton 84] **Walton G.N.**  
A computer algorithm for predicting infiltration and interroom airflows. ASHRAE Transactions, 90, 1, 601-610 (1984)
- [Walton 94] **Walton G.N., Emmerich S.J.**  
CONTAM93 a multizone airflow, a contaminant dispersal model with a graphic user interface, Air Infiltration Review, 16, 1, (1994)
- [Zaheer-Udin 92] **M. Zaheer-Udin**  
Optimal control of a single zone environmental space. Building and Environment 27, 93 - 103 (1992)
- 
-

## ANNEXE A

### Liste exhaustive des publications

- Publications revues ISI (11)
- Communications (24)
- Rapports de contrats (10)
- Publications soumises (6)
- Mémoires (4)







## PUBLICATIONS DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE (11)

[R1] C. Tourrand, H. Boyer, J.P. Chabriat

Caractérisation thermique de parois de construction par des mesures en site réel  
*Revue Générale de Thermique*, n° 387, mars 1994

[R2] H. Boyer, J.P. Chabriat, B. Grondin Perez, C. Tourrand, J. Brau

Thermal building simulation and computer generation of nodal models  
*Building and Environment*, Vol. 31, n° 3, 1996, pp. 207-214

[R3] H. Boyer, F. Garde, J.C. Gatina, J. Brau

A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes  
*Energy and Buildings*, 28 (1998), 1, pp. 71-79

[R4] F. Garde, H. Boyer, J.C. Gatina

Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings  
*Building and Environment*, 34 (1998), 1, pp. 71-84

[R5] H. Boyer, A.P. Lauret, L. Adelard, T.A. Mara

Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation  
*Energy and Buildings*, 29 (1999), 283-292

[R6] L. Adelard, H. Boyer, F. Garde, J.C. Gatina

A detailed weather data generator for building simulation  
Accepté à *Energy and Buildings*, Mars 1999

[R7] A. P. Lauret, H. Boyer, J.C. Gatina

Hybrid modelling of the sucrose cristal growth rate  
Accepté à *International Journal of Modelling and Simulation*, Juillet 1999

[R8] A. P. Lauret, H. Boyer, J.C. Gatina

Hybrid modelling of the sugar boiling process  
Accepté à *Control Engineering Practice*, Août 1999

[R9] F. Garde, H. Boyer

Conception thermique en climat tropical humide, présentation du label ECODOM  
Accepté à *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Oct. 1999

## ACTES DE CONGRES PARUS DANS UNE REVUE

[R10] *L. Adelard, F. Pignolet Tardan, P. Lauret, T. Mara, F. Garde, H. Boyer*

Sky temperature modelling for thermal building application

*Renewable Energy*, 15 (1998) 418-430

Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Italie

[R11] *F. Lucas, T. Mara, F. Garde, H. Boyer*

A comparaison between CODYRUN and TRNSYS, simulation codes for thermal building behaviour

*Renewable Energy*, 15 (1998), Part. II, 1624-1633,

Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Italie

## COMMUNICATIONS (24)

Sélection sur texte et résumé complet, avec actes publiés (15)

[C1] *H. Boyer, J. Brau, J.C. Gatina*

*Multiple Model Software for Airflow and Thermal Building Simulation. A case study under tropical humid climate, in Réunion Island . International Building Performance Simulation Association*, pp. 111-118,

(I.B.P.S.A.), Adelaide (Australie) , Août 1993, ISBN 1-56555-061-7

[C2] *H. Boyer, J.C. Gatina, J. Brau, F. Pignolet*

*Modelisation methods and data structuration induced for simulation codes*

First Joint Conference of International Simulation Societies, ETH, Zurich, 22-25 Août 1994, pp. 729-733

[C3] *F. Garde, H. Boyer, J. Brau, J.C. Gatina*

*Validation expérimentale d'un code de modélisation thermique de bâtiments (CODYRUN). Une application en climat tropical humide*

Colloque Inter-Universitaire de Sherbrooke, 22-25 Mai 1995(Canada)

[C4] *H. Boyer, F. Garde, A. Lauret, J. Brau*

*Description induced by modelisation methods in the case of building thermal simulation*

International Building Performance Simulation Association, (I.B.P.S.A.), Madison (U.S.A.), Août 1995

[C5] *F. Lucas, F. Garde, H. Boyer*

*Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de systèmes de traitement d'air;*

III<sup>ème</sup> colloque inter-universitaire Franco-Québécois, Toulouse, Mai 1997.

[C6] *L. Adelard, F. Garde, H. Boyer*

*Génération de séquences météorologiques pour des applications dans l'habitat*

III<sup>ème</sup> colloque inter-universitaire Franco-Québécois, Toulouse, Mai 1997

[C7] L. Adelard, F. Garde, , F. Pignolet, **H. Boyer**, Gatina J.C.

*Weather data generator for humid climates*

International Thermal Energy & Environment Congress (ITEEC), 9-12 Juin 1997, Marrakesh, Maroc

[C8] F. Garde, **H. Boyer**, F. Pignolet-Tardan, F. Lucas, J. Brau

*Multiple model approach and experimental validation of a residential air-to-air heat pump.*

CLIMA 2000, Bruxelles, Août 1997

[C9] F. Garde, Adelard L., **H. Boyer**, R. Célaire

*Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings.*

CLIMA 2000, Bruxelles, Août 1997.

[C10] L. Adelard, F. Garde, F. Pignolet-Tardan, **H. Boyer**, J.C. Gatina

*Weather sequences for predicting HVAC system behavior in residential units located in tropical climates.*

International Building Performance Simulation Association, IBPSA, Prague, Rép. Tchèque, Sept. 1997, vol. 3, p.49-56

[C11] L. Adelard, F. Pignolet Tardan, P. Lauret, T. Mara, F. Garde, **H. Boyer**

*Sky temperature modelling for thermal building application*

Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Sept. 1998, Italie

[C12] F. Lucas, T. Mara, F. Garde, **H. Boyer**

*A comparaison between CODYRUN and TRNSYS, simulation codes for thermal building behaviour, Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Sept. 1998, Italie*

[C13] L. Adelard, T. Mara, **H. Boyer**, J.C. Gatina

*RUNEOLE : Elaboration of a new tool for weather data sequences generation.*

IBPSA'99, Sept. 1999, Tokyo (Japon)

[C14] F. Garde, F. Lucas, **H. Boyer**, J. Brau

*Nécessité de l'approche multi-modèle pour les systèmes de traitement d'air*

IV<sup>ème</sup> colloque inter-universitaire Franco-Québécois, Montréal (Canada), Mai 1999

[C15] F. Garde, **H. Boyer**, R. Célaire, L. Seauve

*Building design in tropical climates. Elaboration of the ECODOM Standard in the french tropical islands, ISES'99, International Solar Energy Society, Juin 1999, Jerusalem (Israël)*

### Sélection sur résumé, actes publiés (3)

[C16] C. Tourrand, **H. Boyer**, J. Brau, J.C. Gatina

*Analyse comparative de résultats expérimentaux et simulés de paramètres caractéristiques de toitures complexes : une application du logiciel de simulation thermo-aéraulique de bâtiments, CODYRUN*

Séminaire Architecture bioclimatique, A.D.E.M.E., Sophia Antipolis, Juillet 1993

[C17] *F. Pignolet, P. Depecker, H. Boyer, J.C. Gatina*  
*Urban design and thermal ambient problem for humid and tropical climate*  
*Passive and Low Energy Architecture, P.L.E.A.-94, Israël, Juillet 1994.*

[C18] *J. Brau, H. Boyer, J.J. Roux*  
*Modélisation d'une véranda et de sa protection solaire dans l'environnement TRNSYS*  
*Séminaire Français TRNSYS, 17-18 Avril 1998, Nice (France)*

### Manifestations sans actes (6)

[C19] *J.D. Lan Sun Luk, J.P. Chabriat, H. Boyer*  
*Maquette associée au projet ONF dans le cadre de la T.E.S.F.*  
*Journées d'Etude SEE "Transmission d'Energie Sans Fil". Ile de la Réunion*  
*13-16 Décembre 1994*

[C20] *F. Garde, H. Boyer, J.C. Gatina, J. Brau*  
*Présentation du code de calcul CODYRUN et de sa validation expérimentale en climat*  
*tropical humide. Journées d'Etudes SEE (Société des Electriciens et Electroniciens),*  
*thème "Maîtrise de l'énergie", 6-7 Juin 1995 (Ile de la Réunion)*

[C21] *J.C. Gatina, H. Boyer, J.P. Chabriat*  
*Recherches en thermique urbaine et de l'habitat à l'université de la Réunion*  
*Journées d'Etudes SEE (Société des Electriciens et Electroniciens),*  
*Thème "Maîtrise de l'énergie", 6-7 Juin 1995 (Ile de la Réunion)*

[C22] *J.C. Gatina, H. Boyer, F. Garde, T. Mara, P. Hervé*  
*Modélisation de bâtiments et application à la conception bioclimatique de l'habitat*  
*Journées scientifiques de l'Institut de Maîtrise de l'Energie, Université d'Antanarivo*  
*(Madagascar), 8-13 Déc. 1997*

[C23] *F. Pignolet Tardan, L. Adelard, H. Boyer, J.C. Gatina, P. Hervé*  
*Un modèle thermo aéraulique pour l'étude du comportement thermique d'un canyon urbain*  
*Journées Scientifiques de l'Institut de Maîtrise de l'Energie (I. M. E.)*  
*Université d'Antanarivo - 8 – 13 Décembre 1997*

[C24] *H. Boyer*  
*Les recherches en thermique de l'habitat à l'Université de la Réunion*  
*Journées de la Recherche de la Faculté des Sciences et Technologies*  
*18 Mai 1998*

### **Rapports (8)**

[R1] *H. Boyer*  
*Analyse des hypothèses des logiciels de thermique des bâtiments*  
*Convention ADEME – Université de la Réunion, Déc. 1991*

[R2] *H. Boyer, J.C. Gatina*  
*Expertise thermique à l'aide de CODYRUN du bâtiment MCI*  
*Convention ADEME – Université de la Réunion, Avril 1992*

**[R3]** *F. Garde, H. Boyer, L. Vuillemin, J.C. Gatina*

*Mesure in situ de caractéristiques thermiques de parois complexes comportant un Isolant Mince Réfléchissant (IMR), du type sisalation , Société SOVECO, 1993*

**[R4]** *F. Garde, H. Boyer, L. Adelard*

*"Simulations du comportement thermique de logements type à la Réunion et à la Guadeloupe en vue du label ECODOM", convention EDF-Direction des Départements d'Outre Mer, Université de la Réunion, Sept. 1996*

**[R5]** *H. Boyer, F. Garde, T. Mara, F. Lucas, L. Adelard*

*"Rapport de fin de convention cellule expérimentale de mesure en environnement extérieur pour validation du logiciel CODYRUN", Convention ADEME – Université de la Réunion, Déc. 1996*

**[R6]** *H. Boyer*

*Bilan Scientifique 1995-1997, Equipe Génie Civil, Laboratoire de Génie Industriel, Déc. 1997*

**[R7]** *H. Boyer*

*Bilan Scientifique 1998, Equipe Génie Civil, Laboratoire de Génie Industriel, Déc. 1998*

**[R8]** *T. Mara, H. Boyer, F. Garde, F. Lucas*

*Rapport intermédiaire Présentation du site de La Trinité, Sept.1999  
Convention Ministère de l'Equipement du Logement et des Transports, D.D.E. et Laboratoire de Génie Industriel*

**[R9]** *F. Garde, T. Mara, F. Pignolet-Tardan, H. Boyer*

*Rapport intermédiaire Opération expérimentale La Trinité, Sept. 1998  
Convention Ministère de l'Equipement du Logement et des Transports, D.D.E. et Laboratoire de Génie Industriel*

**[R10]** *T. Mara, H. Boyer, F. Garde, F. Lucas*

*Rapport intermédiaire Présentation du site de La Découverte, Mai. 1999  
Convention Ministère de l'Equipement du Logement et des Transports, D.D.E. et Laboratoire de Génie Industriel*

**[R11]** *Equipe Génie civil (travaux collectifs)*

*Rapports d'expertise ECODOM : Analyse de plans et expérimentations simplifiées  
Annexe Convention cadre Université de la Réunion (LGI) – EDF Réunion*

**[R12]** *H. Boyer*

*Bilan Scientifique 1999, Equipe Génie Civil, Laboratoire de Génie Industriel, Nov. 1999*

### **Publications récentes en cours d'évaluation (5)**

**[S1]** *F. Garde, F. Lucas, H. Boyer, J. Brau*

*Multiple model approach of a residential heat pump for integration in building thermal simulation code and comparison with experimental results  
Soumis à ASHRAE Transactions, Juin 1999*

[S2] *F. Garde, H. Boyer, R. Célaire, L. Seauve*

Passive design of buildings in tropical humid climate : from modelisation to implementation and experimental feed back.

Soumis à **Solar Energy**, Oct. 1999

[S3] *F. Garde, T. A. Mara, H. Boyer*

An overview of the validation of dynamic thermal building simulation codes. Presentation of the methodology used in the french island of La Reunion under humid tropical climate

Soumis à **Energy and Buildings**, Nov. 1999

[S4] *T. A. Mara, H. Boyer, F. Garde*

Parametric sensitivity analysis in thermal building using a new method based on spectral analysis

Soumis à **ASME (American. Society of Mechanical Engineers)**

**International Journal of Solar Energy Engineering**, Nov. 1999

[S5] *H. Boyer, A. P. Lauret, T.A. Mara, F. Garde*

A new model for combined and airflow simulation of buildings with embeeded uncertainty analysis

Soumis à **Mathematical Modelling of Systems**, Nov. 1999

### Mémoires (4)

[M1] (Stage d'études 1986) , I.B.M. Montpellier, Laboratoire de Chimie et Matériaux.

*"Etude et réalisation de l'automatisation d'un microscope électronique à balayage"*

[M2] (D.E.A. & Stage de fin d'études 1987) Centre de recherches LAFARGE REFRACTAIRES, Lyon, *"Etude et réalisation d'un conductimètre automatique pour le contrôle de qualité de mortiers"*

[M3] (D.E.S.S. Gestion 1990) *"Etude technique, économique et juridique préalable à l'implantation d'une société de télématique"*

[M4] (Thèse) *"Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles"*, Prix Développement Local de la Caisse des Dépôts et Consignations

## **Annexe B**

*Encadrement doctoral et participation à des jurys*





## **A) Encadrement de thèses :**

### a) Soutenues

**PIGNOLET TARDAN Florence**, *Pourcentage d'encadrement : 20 %*

Financement MRES

*Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide : modélisation thermo aéraulique globale*

Thèse INSA Lyon, Juillet 1996

**GARDE François**, *Pourcentage d'encadrement : 60%*

Financement CIFRE EDF

*Validation de modèle en thermique de l'habitat et intégration détaillée des systèmes de traitement d'air dans un code de calcul multizone et multimodèle*

Thèse Université de la Réunion, Juillet 1997

**ADELARD Laétitia**, *Pourcentage d'encadrement : 20 %*

Financement Région Réunion

*Classification climatique approfondie des régions réunionnaises. Mise en oeuvre d'un générateur de données climatiques cohérentes*

Thèse Université de la Réunion, Oct. 1998

### b) En cours :

**MARA Thierry** , *Pourcentage d'encadrement : 60 %*

Financement Région Réunion

Soutenance prévue : Sept. 2000

*Validation et analyse de sensibilité de codes de simulation thermo-aéraulique de l'habitat.*

**LUCAS Franck**, *Pourcentage d'encadrement : 30 %*

Financement : autofinancement (PRAG IUT)

Soutenance prévue : Sept 2001

*Contribution à l'expérimentation de systèmes de traitement d'air et modélisation et sous environnement TRNSYS.*

**FOCK Eric**, *Pourcentage d'encadrement : 30 %*

Financement CIFRE EDF

Soutenance prévue : Sept 2002

*Modélisation hybride en thermique du bâtiment sous environnements TRNSYS et CODYRUN*

**MIRANVILLE Frédéric**, *Pourcentage d'encadrement : 30 %*

Financement MRES

Soutenance prévue : Sept. 2002

*Détermination des propriétés thermo-physiques de matériaux ou de complexes de matériaux de nouvelle génération en régime dynamique utilisés dans l'habitat en climat tropical humide.*

## **B) Encadrement de DEA :**

L'université de la Réunion étant co-habilitée avec Université de Nancy II pour la délivrance du DEA de Mécanique-Energie, le Laboratoire de Génie Industriel et plus particulièrement notre équipe ont accueilli un nombre important de stagiaires dans ce cadre.

- **F. Lucas (1996)**  
*Modélisation et validation expérimentale de systèmes de traitement d'air*  
*Sujet qui se poursuit en thèse depuis Sept. 1996*
- **T. Mara (1996)**  
*Validation expérimentale d'un code de calcul en thermique des bâtiments.*  
*Sujet qui se poursuit en thèse depuis Sept. 1997, Bourse Région Réunion*
- **D. Calogine (1997)**  
*Etude et réalisation d'un capteur de mesure de température équivalente de ciel. En thèse au LEMTA (Nancy), Bourse MRES 1997*
- **P. Poudroux (1998)**  
*Expérimentation d'un habitat prototype et confrontations avec le code de calcul CODYRUN*  
*Chercheur vacataire au Laboratoire*
- **Lalarandrianasolo (1998)**  
*Simulation aéraulique d'appartements types dans le cadre du label ECODOM.*
- **F. Miranville(1999)**  
*Expérimentation de toitures complexes (IMR) en vue de leur intégration au label ECODOM*  
*Doctorant au sein de l'équipe à compter de Sept. 1999, financement MRES*
- **S. Abelard (1999)**  
*Application des ondelettes à la validation de codes de calcul en thermique du bâtiment*
- **F. Christen (1999)**  
*Perméamètre à air pour des mesures in situ.*  
*(Laboratoire de Sciences de la Terre – Université de la Réunion)*
- **T. Soubdhan (1999)**  
*Validation du code CODYRUN dans le cadre de la procédure BESTEST*

## **C) Participation à des jurys :**

J'ai participé au Jury des trois thèses et des 9 DEA pré-cités.

## **Annexe C :**

*Enseignement et activité pédagogique*

---



## A) Activité d'enseignement :

J'ai enseigné dans l'établissement sous des statuts très différents, allant du chargé de cours extérieur (pendant mon activité salariée privée), puis doctorant vacataire, moniteur, ATER et Maître de conférences. Mes interventions ont eu initialement pour cadre des domaines proches de ma formation initiale, à savoir l'électronique. J'ai aussi participé à des enseignements de premier cycle (Mécanique, physique générale) et mon expérience s'est enrichie dès la deuxième année de monitorat et pendant l'année d'ATER d'une expérience significative en deuxième cycle.

**1989 - 1990**      **Chargé de cours de Physique à l'Université de la Réunion**

**1990-1991**      **Chargé de cours de Physique à l'Université de la Réunion**

*Inscrit en thèse au mois de Décembre 1990, j'ai alors assuré en tant que chargé de cours des enseignements de TP d'électronique et d'analyse numérique.*

- D.E.U.G. S.S.M. 2ème année et D.E.U.S.T. Maintenance Industrielle
- Licence es Sciences Physiques
- Licence de Physique et Applications

**1991-1992**      **Moniteur d'enseignement :**

- D.E.U.G. S.N.V. 1<sup>ère</sup> année : TP de Physique Générale
- D.E.U.G. S.S.M. 2ème année : TP et TD d'Electronique

**1992-1993**      **Moniteur d'enseignement en Physique (2<sup>ième</sup> année)**

- D.E.U.G. S.S.M. 2ème année : TP et TD d'Electronique Analogique et Numérique
- Licence es Sciences Physiques : Cours d'Electricité

**1993-1994**      **A.T.E.R. à l'Université de la Réunion (192 h)**

- D.E.U.G. S.N.V. 1<sup>ère</sup> année,                      TD de *Mécanique*
- D.E.U.G. S.T.A.P.S. 1<sup>ère</sup> année :              TD de *Mécanique*
- D.E.U.G. S.N.V. 2<sup>ième</sup> année :              Cours et TD de *Mathématiques pour la Physique (UV MP)*
- Licence Ingénierie Electrique :              TP et TD d' *Automatique des systèmes linéaires et échantillonnés*

**Depuis Sept 1994**      **Maître de conférences**

*Au fur et à mesure, compte tenu cependant des différents besoins du département, j'ai recentré sensiblement mes enseignements sur les thèmes premiers de mon activité de recherche (thermique, thermique de l'habitat) ou sur de domaines connexes qui trouvent (à court ou moyen terme) des applications en recherche (automatique). C'est à mon sens de par l'essence même du métier d'enseignant chercheur que des apports réciproques entre les activités de recherche et de l'enseignement doivent se tisser.*

- DEA de Mécanique Energétique (co-habilitation avec Université de Nancy II)  
Cours de *Thermique de l'habitat* (15 h)  
dans le cadre d'une option dispensée à la Réunion.
- Maîtrise de Physique:  
Cours, TD d'*Automatique des systèmes d'état*  
Encadrement de projets
- Licence Ingénierie Electrique :  
Cours, TD et TP d'*Automatique des systèmes linéaires*.  
Encadrement de projets.
- Licence es Sciences Physiques :  
Cours d'*Electricité*
- Licence de Physique et Applications :  
Cours d'*Electronique*

**Depuis Sept. 1997**      **Maître de conférences 1<sup>ère</sup> classe, sur contingent CNU**

Arrêt de mes enseignements en Electricité, Electronique, remplacés par

- Maîtrise de Physique : Cours, TD, TP de Transferts Thermiques

**Pour 1998**, je suis intervenu spécifiquement :

---

---

Dans le cadre du DUMEE (Diplôme d'Université de Maîtrise de l'Energie et de l'Environnement), dans un cours de Thermique des bâtiments (6 h)  
A l'IUT de Génie Civil pour des enseignements d'Informatique appliquée au Génie Civil (8C, 21 TP)

**A compter de 1999**, je remplace progressivement mes enseignements d'Automatique par ceux suivants :

DEUG SM2 :	TD de Mécanique du Solide
IUT Génie Civil 2 <sup>ième</sup> année :	Cours et TD de Thermique du bâtiment dans le cadre des enseignements spécifiques

## B) Activité pédagogique :

Sous la responsabilité des directeurs successifs du Département Physique Mécanique, les tâches administratives liées à la pédagogie ont été réparties au niveau de plusieurs enseignants-chercheurs de manière à partager ces charges. En marge des responsabilités habituelles inhérentes à notre activité, mon activité au sein du *département de Physique Mécanique* a été et est la suivante :

- Depuis 1994, je suis responsable du module M2 (Automatique Electronique) de la Licence d'Ingénierie Electrique.
  - Pour 96-97, j'ai été co-responsable de la Maîtrise de Physique et Applications  
J'ai assuré la coordination des Modules M1 (Thermique) et M2 (Automatique et Analyse Numérique)
  - Depuis l'année 97-98, j'assume la **responsabilité de cette même filière**, devenue depuis Maîtrise de Physique, mention physique et applications, en plus de celle des modules précédents (M1, M2) et le module de stage (M6). Dans ce dernier cas, la recherche des stages, leur organisation en dehors de l'université et leur soutenance ont été gérés par moi-même. En particulier, j'ai mené à bien le montage du dossier de demande de renouvellement d'habilitation pour cette filière.
  - Par ailleurs, en collaboration avec d'autres enseignants du département de physique mécanique, j'ai été l'un des correspondants de la Faculté des Sciences et Technologies vis à vis de la mise en place du *Département de Génie Civil* de l'Institut Universitaire de Technologie (I.U.T.), lequel département a ouvert ses portes à la rentrée de septembre 1998.
- 
-

Une articulation très forte avec ce département est trouvée, tant en terme de complémentarité dans l'offre de formation de l'Université de Réunion que de poursuite d'études. A ce titre, au sein de l'I.U.T., je suis responsable

- ✓ du laboratoire de *Thermique Electricité* (définition de matériel de Travaux Pratiques, montage de 8 TP, participation à la préparation d'un polycopié)
  - ✓ du laboratoire d'*Informatique* et des enseignements de première année d'informatique appliquée au génie civil (définition de matériel et montage de 7 TP de programmation en langage C, rédaction d'un polycopié de cours et d'un autre de TP)
- Au rang de la création de filière, je suis chargé par le département de Physique mécanique de la mise en place d'un deuxième cycle en Génie Civil. Cette responsabilité a été celle de entre autres l'identification de besoins locaux en matière de formation, l'articulation avec les filières existantes, pour déboucher in fine sur la rédaction de la demande d'habilitation. Cette dernière nous a été accordée pour la rentrée de Septembre 1998, mais nous avons préféré différer d'un an l'ouverture de la Licence de Génie Civil. L'argumentaire lié à cette création de filière tient :
    - Pédagogiquement parlant à assurer une passerelle entre nos premiers cycles (DEUG, IUT) et les 3<sup>èmes</sup> cycles (DEA co-habilité Univ. Nancy II, Univ. de la Réunion et le D.U.M.E.E., Diplôme d'Université en Maîtrise de l'Energie et Environnement, dans le cadre de l'Université de l'Océan Indien)
    - En terme d'emploi pour nos étudiants à un gisement existant, les secteur BTP étant dans les DOM comme ailleurs un secteur à forte activité économique.
    - A la création d'un deuxième cycle venant étayer notre activité de recherche en génie civil. Une articulation très forte est naturellement trouvée entre l'activité recherche poursuivie au sein de l'équipe génie civil du Laboratoire de Génie Industriel. Cette formation se conçoit donc comme une véritable formation universitaire, favorisant une diffusion réciproque des activités d'enseignement et de recherche. Les supports de recherche (cellule de recherche, outils logiciels, ...) constitueront des supports très intéressants de projets ou de TER. Compte tenu des besoins du domaine à la Réunion et dans la zone, cette formation constitue aussi un préalable à l'ouverture de notre activité de recherche à d'autres secteurs du Génie Civil que la thermique des bâtiments (Matériaux, Acoustique, ...)
- 
-

### C) Encadrement de stagiaires de deuxième cycle :

J'ai eu l'occasion d'encadrer des stagiaires provenant de formations extérieures. Cependant, en tant qu'enseignant au sein de la Maîtrise de Physique, co-responsable, puis responsable de cette filière, j'ai préférentiellement encadré des étudiants de cette formation, sur des sujets souvent étroitement liés à notre activité de recherche. Ces sujets mettent parfois à profit les enseignements que j'effectue (ou ai effectués) en dehors du strict domaine Génie civil thermique (Electronique et Automatique en particulier).

*L. Vuillemin, INSA de Lyon, Département Génie Civil et Urbanisme (1994)  
Expérimentation in situ d'une toiture complexe*

*M. Forestier, MST de Physique appliquée à l'habitat et au milieu de vie de Toulouse (1995), Analyse de données de simulation d'un logement.*

*P. Seroc – F. Maillot, Licence d'Ingénierie Electrique, (1995), Amplificateurs et filtres pour signaux EMG.*

*V. Verdeil, INSA de Lyon, Département Génie Civil et Urbanisme.(1995)  
Developpement d'un générateur de séquences climatiques sous environnement TRNSYS*

*T. Pavadepoullé, Maîtrise de Physique et Applications (1995).  
Expérimentation détaillée d'une toiture complexe en laboratoire*

*M. Olive, INSA de Lyon, Département Génie Civil et Urbanisme.(1996)  
Simulations à l'aide du code CODYRUN et expérimentation in situ*

*M. Forestier, MST de Physique appliquée à l'habitat et au milieu de vie de Toulouse (1997), Simulations à l'aide du code CODYRUN dans le cadre du label ECODOM*

*S. Laporte, Maîtrise de Physique et Applications (1997)  
Expérimentation thermique d'un logement dans le cadre du label ECODOM  
EDF - Réunion*

*M. S. Taristas, Maîtrise de Physique et Applications (1997)  
Développement d'un modèle thermique simplifié de bâtiment sous MATLAB et introduction à l'analyse et à la réduction modale*

*C. Tourville, Maîtrise de Physique et Applications (1997)  
Analyse de signaux appliquée à la thermique de la cellule LGI*

*C. Hoareau , Maîtrise de Physique et Applications (1998)  
Mise en œuvre d'un prototype de perméamètre à air pour des mesures situ  
(Laboratoire de Sciences de la Terre)*

*A. Nagou, Maîtrise de Physique (1999)  
Developpement sous MATLAB d'un observateur d'état pour la cellule LGI.*

---



*M. Fontaine, Maîtrise de Physique (1999)  
Modélisation et expérimentation de la thermique d'une flaque d'eau  
(IRD – Ex ORSTOM)*

Par ailleurs, j'ai participé conjointement à d'autres membres de l'équipe à l'encadrement d'autres stagiaires (8 au total) de cette même formation, sans en être responsable.

#### D) Activités administratives :

- Des rentrées 1994 à 1997, j'ai été chargé de la centralisation et de l'harmonisation des services d'enseignement du département.
  
- Président de Jury de Bac séries technologiques pour 1996 et 1999
  
- Depuis la rentrée 98, je suis membre élu du collège des Maîtres de conférences de deux commissions de spécialistes de la Faculté des Sciences et Technologies, en Physique (sections 60, 61, 62, 63, 37 et 27) et Géologie (sections 35 et 36).
  
- Au titre de la recherche, j'assume en tant que responsable d'équipe une part importante d'activité administrative, en liaison avec le directeur de laboratoire :
  - Etablissement et suivi administratif de conventions (échéances, rapports, ...)
  - Demandes de financement (Etat, Collectivités, ADEME, ...)
  - Demandes de financement de thèses
  - Suivi financier de conventions et des comptes associés (engagements, ...)

# Annexe D

*Responsabilité de contrats de recherche*



- Contrat d'étude *Les logiciels de thermique du bâtiment*, ADEME – 1991 (40 kF)
- *Diagnostic thermique bâtiment MCI à l'aide de CODYRUN*, ADEME – 1992 (40 kF)
- Convention *Mesure in situ de caractéristiques thermiques de parois complexes comportant un Isolant Mince Réfléchissant (IMR), du type sisalation*, société SOVECO 1993, (40 kF)
- *Cellule expérimentale de mesure et de validation des codes en thermique du bâtiment* ADEME- 1994 (100 kF)
- Contrat de *simulations CODYRUN dans la cadre de l'établissement du label ECODOM* EDF – Direction des Département d'Outre Mer, 1996 (75 kF)
- Convention CORTECHS Société RPI (Réunion Plafonnages Industries) *Procédé de fabrication de bâtiments évolutifs performants*. 1996 (20 kF)
- *Etude expérimentale de validation des prescriptions du label ECODOM*, Ministère de l'Equipement, du Logement et des Transports, 1998 (374 kF)

En marge des précédents, cette fois en co-responsabilité avec d'autres membres de l'équipe, j'ai participé (ou je participe pour les action en cours) à d'autres contrats tels que

- *Mesures expérimentales dans un atelier de congélation*, Société Crête d'Or, 1997 (15 kF)
- *Mise en œuvre d'une habitation ECODOM*, Société Arch'image, 1997, (18 kF)
- *Participation au comité de pilotage ECODOM*, EDF-Réunion, 1998, (26 kF)  
Action poursuivie en 1999
- *Campagne de mesures associées au label ECODOM en Guadeloupe*, Société SUNSTICE (B.E.), 1998 (62 kF)
- Assistance à un Maître d'ouvrage (SIDR)  
*Réhabilitation thermique de bâtiments*, 1999 (150 kF)
- Assistance à un Maître d'ouvrage (SODEGIS)  
*Expertise et mesures thermique dans un bâtiment*, 1999 (150 kF)
- Expertise pour le compte d'EDF Réunion, 1999, (10 kF)  
Détermination de paramètres constituant d'une paroi au départ de mesures in situ.



N°d'ordre

Année 1999

# Mémoire

*présenté*

DEVANT L'UNIVERSITE DE LA REUNION

*pour obtenir*

Le grade de

Docteur HABILITE A DIRIGER LES RECHERCHES

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE LA CONCEPTION

présenté par Harry BOYER

Ingénieur de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM)  
Docteur de Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon)

Maître de conférences à l'Université de La Réunion  
Département de Physique - Mécanique  
Laboratoire de Génie Industriel



**Thermique et aéraluque des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications**

## **Annexe E : Principales publications**

A soutenir le 6 *Décembre* 1999 devant la commission d'examen

Jury	J. BRAU	Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
	G. ACHARD	Professeur, Université de Savoie
	A. DELSANTE	Dr., CSIRO, Adelaïde (Australie)
	J. C. GATINA	Professeur, Université de La Réunion
	P. HERVE	Professeur, Université de La Réunion
	O. SERO-GUILLAUME	Directeur de Recherches CNRS, LEMTA, INPL Nancy



## **Articles de revues :**

- H. Boyer, J.P. Chabriat , B. Grondin Perez, C. Tourrand, J. Brau  
*Thermal building simulation and computer generation of nodal models*  
Building and Environment, Vol. 31, n° 3, 1996, pp. 207-214
- H. Boyer, F. Garde, J.C. Gatina, J. Brau  
*A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes*  
Energy and Buildings, 28 (1998), 1, pp. 71-79
- H. Boyer, A.P. Lauret, L. Adelard, T.A. Mara  
*Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation*, Energy and Buildings,29 (1999), 283-292
- F. Garde, H. Boyer, J.C. Gatina  
*Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings*  
Building and Environment, 34 (1998), 1, pp. 71-84

## **Communications :**

- H. Boyer, J. Brau, J.C. Gatina  
*Multiple Model Software for Airflow and Thermal Building Simulation. A case study under tropical humid climate, in Réunion Island . International Building Performance Simulation Association (I.B.P.S.A.), Adelaide (Australie) , Août 1993*
- H. Boyer, J.C. Gatina, J. Brau, F. Pignolet  
*Modelisation methods and data structuration induced for simulation codes*  
First Joint Conference of International Simulation Societies, ETH, Zurich, 22-25 Août 1994
- H. Boyer, F. Garde, A.P. Lauret, J. Brau  
*Description induced by modelisation methods in the case of building thermal simulation*  
International Building Performance Simulation Association, (I.B.P.S.A.), Madison (U.S.A.), Août 1995
- F. Garde, H. Boyer, F. Pignolet-Tardan, F. Lucas, J. Brau  
*Multiple model approach and experimental validation of a residential air-to-air heat pump.*  
CLIMA 2000, Bruxelles, Août 1997

## **Publications soumises :**

- T. A. Mara, H. Boyer, F. Garde  
*Parametric sensitivity analysis in thermal building using a new method based on spectral analysis*, soumis à ASME (American. Society of Mechanical Engineers), International Journal of Solar Energy Engineering

- H. Boyer, T. A. Mara, F. Garde, A. P. Lauret  
*A new model for combined building thermal and airflow simulation with embeded uncertainty analysis*, soumis à Energy Conversion and Management.