



**HAL**  
open science

# Validation de codes de simulation thermo-aéraulique du complexe bâtiment/systemes de climatisation.

## Application à la conception thermique des bâtiments

François Garde

### ► To cite this version:

François Garde. Validation de codes de simulation thermo-aéraulique du complexe bâtiment/systemes de climatisation. Application à la conception thermique des bâtiments. Génie civil. Université de La Réunion, 2001. tel-01399994

**HAL Id: tel-01399994**

**<https://hal.univ-reunion.fr/tel-01399994>**

Submitted on 21 Nov 2016

**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.



Université de la Réunion

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE LA CONCEPTION

présentée par **François GARDE**

*Ingénieur de l'Ecole Centrale de Lyon  
Docteur de l'Université de La Réunion*

Maître de Conférences au Département Génie Civil,  
I.U.T. de Saint-Pierre, Université de la Réunion.

Chercheur au Laboratoire de Génie Industriel.

Pour l'obtention du grade de  
Docteur Habilité à Diriger des Recherches

**Validation de codes de simulation thermo-aéraulique du  
complexe bâtiment/systemes de climatisation.  
Application à la conception thermique des bâtiments.**



A soutenir le 18 décembre 2001 devant la commission d'examen

Jean BRAU

Jean LEBRUN

Michel BERNIER

Olivier SERO-GUILLAUME

Patrick HERVE

Jean-Claude GATINA

Harry BOYER

Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Professeur, Université de Liège, Belgique

Professeur, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada

Directeur de Recherches CNRS, LEMTA, INPL, Nancy

Professeur, Université de La Réunion

Professeur, Université de La Réunion

Professeur, Université de La Réunion



Université de la Réunion

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE LA CONCEPTION

présentée par **François GARDE**

*Ingénieur de l'Ecole Centrale de Lyon  
Docteur de l'Université de La Réunion*

Maître de Conférences au Département Génie Civil,  
I.U.T. de Saint-Pierre, Université de la Réunion.  
Chercheur au Laboratoire de Génie Industriel.

Pour l'obtention du grade de  
Docteur Habilité à Diriger des Recherches



**Validation de codes de simulation thermo-aéraulique du  
complexe bâtiment/systèmes de climatisation.  
Application à la conception thermique des bâtiments.**

A soutenir le 18 décembre 2001 devant la commission d'examen

- |                        |   |
|------------------------|---|
| Jean BRAU              | Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon |
| Jean LEBRUN            | Professeur, Université de Liège, Belgique                     |
| Michel BERNIER         | Professeur, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada           |
| Olivier SERO-GUILLAUME | Directeur de Recherches CNRS, LEMTA, INPL, Nancy              |
| Patrick HERVE          | Professeur, Université de La Réunion                          |
| Jean-Claude GATINA     | Professeur, Université de La Réunion                          |
| Harry BOYER            | Professeur, Université de La Réunion                          |

# Sommaire

**1<sup>ère</sup> Partie : Présentation générale des activités de recherche. Environnement scientifique (Pages 1-22)**

**2<sup>ème</sup> Partie : Développement des activités de recherche (Pages 23-148)**

*Chapitre 1*

Mise en place d'un environnement recherche à l'IIUT de Saint-Pierre.....25

*Chapitre 2*

Présentation des travaux liés à la validation de codes de simulation thermo-aérodynamique de bâtiments.....67

*Chapitre 3*

Développement d'un modèle adimensionné de système de traitement d'air. Prise en compte du régime permanent et dynamique.....93

*Chapitre 4*

Le transfert de connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles – Le cas de la conception thermique des bâtiments en climat tropical.....121

*Chapitre 5*

Perspectives.....139

**3<sup>ème</sup> Partie : Autres activités (Pages 149-170)**

**Bibliographie.....171**

**Annexes : (Pages 181-201)**

A- Liste exhaustive des publications.....183

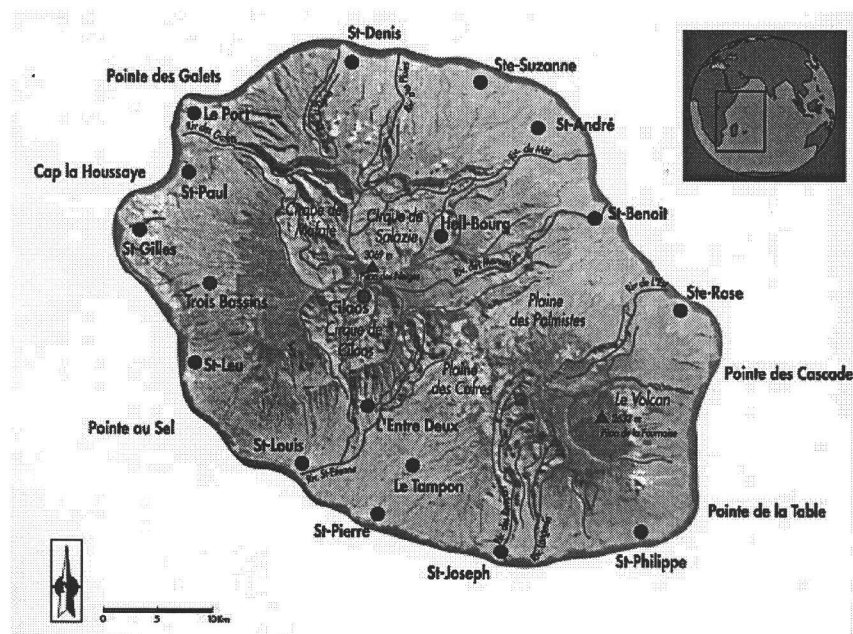
B- Encadrement doctoral et participation à des jurys.....191

C- Responsabilités de contrats de recherche.....195

D- Principales publications.....199

# 1<sup>ère</sup> Partie

Présentation générale des activités de recherche.  
Environnement scientifique.



## Sommaire 1<sup>ère</sup> Partie

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction .....</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Curriculum Vitae .....</b>                                   | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Activités professionnelles antérieures au doctorat .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Contexte universitaire et régional .....</b>                 | <b>7</b>  |
| <b>5</b> | <b>Présentation du Laboratoire de Génie Industriel .....</b>    | <b>8</b>  |
| 5.1      | Historique .....  | 8         |
| 5.2      | Fiche signalétique - LGI Equipe GC-Th.....                      | 9         |
| <b>6</b> | <b>Activités d'encadrement et de recherche .....</b>            | <b>11</b> |
| 6.1      | Les activités de recherche.....                                 | 11        |
| 6.2      | Les activités d'encadrement .....                               | 20        |

# 1 Introduction

Cette première partie de mon habilitation à diriger des recherches fait une synthèse de l'environnement scientifique mis en place depuis la fin de ma thèse en 1997, vis à vis des thématiques de recherche qui ont pu être menées mais également vis à vis des moyens humains, matériels et financiers nécessaires à la réalisation et à la pérennité de ces thématiques.

Je parlerai dans un premier temps au travers de mon curriculum vitae de mon parcours précédant la thèse. Nous verrons que les activités professionnelles exercées avant ma thèse apportent un éclaircissement sur mon cursus universitaire et les thématiques de recherche qui en ont découlé.

Nous présenterons ensuite le contexte particulier de l'Université de La Réunion, les spécificités liées à l'environnement régional et le positionnement du Laboratoire de Génie Industriel (dont je fais partie) dans cet environnement.

Nous aborderons enfin de manière synthétique les thématiques et les activités de recherche qui ont été menées pendant 5 ans ainsi que l'ensemble des personnes, doctorants et collègues qui m'ont accompagné dans ces travaux. La deuxième partie de l'HDR apportera davantage de précisions quant au développement des activités de recherche proprement dites et des travaux en cours.

## 2 Curriculum Vitae

Nom : GARDE  
 Prénoms : François, Philippe, Marie  
 Date et lieu de naissance : 21 mars 1967 à Reims (51)  
 Nationalité : Française  
 Situation familiale : Marié  
 Adresse personnelle : Apt 8 Résidence Corail, Allée Bassin 18, Ravine des Cafres  
 97 470 Saint-Pierre  
 Téléphone : 0262 31 09 73 / 0262 96 28 95  
 Adresse électronique : garde@univ-reunion.fr

### Expérience professionnelle

- 1994-97 Ingénieur de recherche en convention CIFRE au service Maîtrise de l'Energie à EDF Ile de la Réunion.  
Chargé de l'élaboration d'un label de qualité sur la conception des logements neufs dans les DOM (label ECODOM). Responsable des économies d'énergie dans les bâtiments tertiaires et résidentiels.
- 1991-94 Ingénieur chargé d'opérations à INSET, bureau d'études spécialisé en équipements techniques, à l'Ile de la Réunion.  
Responsable d'étude et de réalisation d'installations de climatisation et de sécurité incendie, suivi de chantier ;  
Réalizations de diagnostics énergétiques dans les secteurs industriels et tertiaires.
- 1989-91 Volontaire à l'Aide Technique (service national) au lycée Roland Garros, ville du Tampon, Ile de la Réunion.  
Enseignant en BTS Equipement Technique et Energie, option Froid et Climatisation.

### Fonctions universitaires

- 2000-01 Maître de Conférences, Département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre.
- 1998-2000 Maître de Conférences, Département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre.  
Direction du Département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre, Université de La Réunion
- 1997-98 A.T.E.R. à l'Université de la Réunion, Département de Physique-Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies. Responsable de la mise en place du Département Génie Civil de l'I.U.T. de Saint-Pierre, Ile de la Réunion ;
- 1994-97 Doctorant en convention CIFRE au Laboratoire de Génie Industriel, Université de La Réunion, en partenariat avec Electricité de France.

### Formation

- 1997 Doctorat de Génie Civil, mention Génie Civil – Thermique, Université de la Réunion  
*Intitulé : Validation et développement d'un modèle thermo-aéroulque de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes.*  
Directeurs de Thèse :  
Pr. Jean-Claude GATINA, LGI, Université de la Réunion (60<sup>ième</sup>)  
Pr. Jean BRAU, INSA de Lyon, CETHIL / ETB – UPRES A CNRS 5008 (60<sup>ième</sup>)  
Mention : Très honorable avec les félicitations du jury
- 1994 Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (D.E.S.S) : Certificat d'Aptitude à l'Administration des Entreprises (C.A.A.E.)  
Institut d'Administration des Entreprises (I.A.E.) de Lyon III (en formation continue)
- 1989 Ingénieur de l'Ecole Centrale de Lyon. *Spécialité* : Mécanique



## Divers

- Membre associé de l'ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers).
- Membre du groupe de travail de la Task 22 de l'International Energy Agency portant sur les outils d'analyse énergétique de bâtiments.
- Membre des commissions techniques d'attribution des projets de bâtiments publics (lycées, collèges, écoles) sur les aspects liés à la conception thermique et à la maîtrise de l'énergie.
- Chargé par le Président de L'Université de La Réunion de la politique énergétique et de la Maîtrise de l'Energie dans les nouveaux projets de bâtiments du Contrat de Plan Etat Région, en collaboration avec la Division du Patrimoine et de la Logistique (DIPAL) de l'Université.
- Membre du comité de pilotage ECODOM (comité piloté par EDF qui assure le suivi technique, scientifique et financier des opérations de logements ECODOM).

## 3 Activités professionnelles antérieures au doctorat

Il m'est apparu utile de placer mon Curriculum Vitae au début de ce mémoire car celui-ci peut expliquer en partie mon attrait pour les sciences appliquées et en particulier la thermique du bâtiment et des systèmes associés. En effet, mon parcours dans le domaine de la recherche a été et reste marqué par la coexistence des cultures universitaires et industrielles.

Pour mon service national, j'ai choisi d'être affecté à l'île de La Réunion en tant que Volontaire de l'Aide Technique. Après deux années passées au titre de l'armée en tant qu'enseignant en BTS Froid et Climatisation (actuellement renommé Equipement Technique et Energie), j'ai travaillé durant trois années dans un bureau d'études technique (B.E.T. INSET) à l'île de la Réunion en tant qu'ingénieur chargé de projets.

Je m'occupais principalement de la réalisation de diagnostics énergétiques [Garde 93] dans les milieux industriels et tertiaires. Ces diagnostics (financés en grande partie par EDF) avaient pour objectif d'identifier dans un premier temps les postes consommateurs en énergie et les dysfonctionnements des process industriels et/ou des systèmes de production d'énergie (froid/chaud etc.) et dans un second temps de proposer des solutions économes en énergie. Les diagnostics réalisés à cette époque m'a permis d'identifier un certain nombre de pathologies récurrentes portant à la fois sur l'enveloppe de bâtiment (mauvaise protection solaire de l'enveloppe), sur la gestion de l'air (quand celle-ci est prévue), sur le (mauvais) choix de système de production de froid (pas de système centralisé type groupe à eau glacée), et sur l'absence de gestion de l'énergie. Ainsi, je me suis rendu compte qu'un grand nombre de dégradation de bâtiments provenait essentiellement d'une mauvaise gestion de l'air et que les conséquences néfastes étaient le plus souvent l'apparition de condensation et d'humidité générant des frais d'exploitation importants tant en maintenance qu'en coût de fonctionnement. L'expérience acquise durant ces années de pratiques influencera quelques années plus tard certaines thématiques de recherche au sein de l'équipe [Lucas 00]. Une note a d'ailleurs été rédigée pour prévenir les risques de mauvaise conception de bâtiment et des systèmes pour les nouveaux projets de bâtiments de l'Université dans le cadre du contrat de plan Etat/Région [Garde 01g].

En dehors de l'activité de diagnostic, j'avais également en charge les phases d'ingénierie « classiques » pour un BET Fluides, à savoir la conception et le dimensionnement d'installations de climatisation, d'installation de sécurité incendie pour les projets de

bâtiments et la réhabilitation. Les plus gros projets à l'époque sous ma responsabilité étaient l'extension de l'aéroport international de Roland Garros (dimensionnement et choix de solutions techniques pour les installations de climatisation) et l'aménagement d'un grand centre commercial dans le centre ville de Saint-Denis (dimensionnement d'une protection incendie de type sprinkler et des installations de désenfumage). Je me suis formé à cette époque aux outils de dimensionnement utilisés par les BET lors de phases de conception. Dans la pratique, ces outils utilisés pour l'établissement de bilans thermiques et le dimensionnement d'installations de climatisation sont limités dans le meilleur des cas à des méthodes dites « statiques » telles que celles proposées dans [Carrier 60] ou [Carrier 91]. Au pire des cas, l'expérience du prescripteur, l'utilisation de ratio en fonction du type de bâtiment (bureaux, hôtel etc.) et un coefficient de sécurité sur la puissance frigorifique du groupe de froid suffisent pour dimensionner l'installation. Ainsi, des outils comme TRNSYS ou un quelconque code de simulation en régime dynamique ne sont pas utilisés dans la pratique. Les raisons principales sont souvent le manque de temps disponible par les professionnels pour s'approprier de nouveaux outils et surtout le manque de communication entre le monde universitaire et le monde privé. J'ai réellement été confronté à ce problème en tant qu'ancien prescripteur, c'est sans doute pour cette raison que je reste très sensible au problème du transfert de connaissance entre le monde de la recherche et les pratiques professionnelles. L'un des chapitres de mon HDR traite exclusivement des recherches qui ont été menées au sein de l'équipe Génie Civil pour chercher à le résoudre. Par ailleurs, cette problématique est bien réelle et commune à l'ensemble de la communauté scientifique puisqu'il s'agit de l'un des objectifs de la Task 22 de l'IEA dont nous parlerons dans ce mémoire [Holtz96] [IEA 94]. Certaines publications récentes traitent également de ce sujet [Ellis 01].

Cette période dans le milieu professionnel m'a été profitable sur plusieurs points :

- Les années passées dans le secteur privé m'ont permis d'acquérir une autonomie, une rigueur et une organisation dans le travail qui me servent encore au cours de mon parcours universitaire pour la réalisation de projets tels que le suivi de chantier de l'IUT, la création du département Génie Civil et la mise en place de l'activité recherche dans le sud de La Réunion ;
- L'expérience du secteur privé m'a permis de connaître l'ensemble des acteurs locaux liés au milieu du bâtiment, que ce soit dans le domaine privé, public ou institutionnel. Ce réseau de partenaire a été utile lors de la mise en place de l'opération ECODOM ou encore lors de financements de contrats de recherche pour l'équipe et l'aide au montage du département Génie Civil ;
- Enfin, le fait d'avoir été ingénieur avant d'être universitaire permet de mieux comprendre les préoccupations de la profession et d'améliorer en quelque sorte la communication entre le monde universitaire et le monde professionnel. Cette passerelle est utile dès lors qu'il s'agit de transférer la connaissance et les outils issus de la recherche vers les pratiques professionnelles.

## 4 Contexte universitaire et régional

L'Université de La Réunion occupe une position singulière au sein du système de l'enseignement supérieur français. En effet, la démographie importante à l'île de La Réunion entraîne un flux d'étudiants qui augmente de manière exponentielle. A titre d'information, le nombre d'étudiants inscrits à la rentrée 2000-01 était de 10 690 (dont 2500 environ en Sciences + DUT Génie Civil). Il y a dix ans, ce nombre était deux fois moins important (5000 inscrits). Les prévisions de l'INSEE prévoient par ailleurs un doublement des effectifs actuels à l'horizon 2020.

Pour faire face à cette augmentation, les priorités de l'Université de La Réunion (créée en 1982) ont été et sont toujours d'augmenter la capacité d'accueil des étudiants, de développer les filières existantes et d'élargir l'offre de formation en allant vers des filières professionnalisantes ou franchement professionnelles comme les licences professionnelles et les DESS.

En parallèle au développement de l'Université se pose le problème du tissu industriel réunionnais caractérisé par un développement limité et l'absence de recherche privée industrielle. Seul le milieu sucrier a permis à un certain moment de développer un savoir faire technologique local reconnu internationalement [Hugot 87]. Hormis le milieu sucrier, les seuls secteurs potentiellement créateurs d'emploi dans le domaine des sciences sont les secteurs liés à l'agro-alimentaire et ceux relatifs au BTP, à l'énergie et à l'environnement. Le taux de chômage à La Réunion reste néanmoins le plus élevé des Départements d'Outremer français avec 36.5% en 2000.

Par ailleurs, l'île de La Réunion doit faire face à un problème énergétique croissant lié à l'évolution de sa démographie. En effet, que ce soit dans le secteur du logement, le secteur tertiaire ou autres, les besoins en énergies fossiles ou renouvelables sont proportionnelles à l'évolution de la population. Dans le domaine du bâtiment, le nombre de constructions en logements ou en bâtiment tertiaire est amené à augmenter considérablement. En 1998, l'habitat et le tertiaire représentaient 40% de la consommation d'énergie totale (pour un montant total de 1 Mtep). L'absence de réglementation thermique dans les DOM alliée à des contraintes économiques de coût de construction et des pratiques architecturales importées directement de la métropole ont longtemps favorisé l'éclosion de bâtiments totalement inadaptés aux climats tropicaux. Ces bâtiments sont bien évidemment fortement consommateurs en énergie et inconfortables d'un point de vue thermique. Malgré des progrès récents dus à une sensibilisation de la profession dans le domaine de l'énergie (grâce au label ECODOM et aux nouveaux projets à Haute Qualité Environnementale), il n'en reste pas moins que les besoins en puissance sont amenés à augmenter chaque année.

Pour faire face à cette demande énergétique croissante, les moyens de production de l'électricité assurent pour le moment la couverture totale des besoins. Toutefois, ceux -ci restent limités et coûteux, et les extensions futures du parc de production ne permettront sûrement pas de compenser la totalité de la demande d'électricité dans les décennies à venir.

Pour limiter cette progression, on a assisté depuis plusieurs années à une volonté politique (menée principalement par EDF l'ADEME et la Région Réunion) de développer des actions

de maîtrise de l'énergie (M.D.E.) principalement portées dans des domaines liés à la conception thermique des bâtiments [Garde 99], au déplacement des consommations de pointe (chauffe eaux à accumulation) et à la recherche de systèmes performants (stockage de froid, lampes basses consommation). Depuis quelques mois, on observe une volonté politique de développer les énergies renouvelables jusqu'ici limitées aux chauffe-eaux solaires et à la notion de confort thermique dans les bâtiments. Ce nouvel axe de développement fortement incité par La Région Réunion provient des récents décrets nationaux donnant toute latitude aux régions quant à l'autonomie de leur gestion énergétique. L'objectif annoncé par La Région Réunion et la nouvelle Agence Réunionnaise des Energies Renouvelables (ARER) est le développement tout azimut des énergies renouvelables pour assurer l'indépendance énergétique de La Réunion en 2025, le souhait de l'ARER et de La Région Réunion étant de développer un partenariat durable avec l'Université de La Réunion sur ce thème.

En résumé, nous pouvons dire que l'Université de La Réunion est en pleine expansion et souhaite développer des filières professionnelles. L'île de La Réunion va être rapidement confrontée à un problème de maîtrise de la demande d'électricité qui peut être limité par une meilleure gestion des postes consommateurs en énergie (enveloppe de bâtiments, systèmes de production de chaud de froid, éclairage etc.) et en développant de nouveaux moyens de production de l'énergie (énergies renouvelables). Le contexte économique local autour des ENR et du confort thermique va sans aucun doute générer de nouveaux besoins qui seront profitables à l'Université en terme de création de nouvelles formations, en terme de recherche dans les domaines de la maîtrise de l'énergie, de la conception thermique des bâtiments et des énergies renouvelables et en terme économique en favorisant l'émergence de nouveaux métiers issus de la recherche.

## 5 Présentation du Laboratoire de Génie Industriel

### 5.1 Historique

Le Laboratoire de Génie Industriel (EAD n°2524) s'implique fortement dans le domaine de la conception thermique des bâtiments, de l'énergétique solaire et des systèmes associés depuis maintenant plus d'une vingtaine d'années.

Les thématiques initiées par le précédent directeur (Jean Claude Gatina, Pr. 60<sup>ième</sup> section CNU) étaient principalement la thermique des bâtiments et l'énergétique sucrière. Le souhait de Jean Claude Gatina lors de la création du laboratoire (en 1990) était d'avoir une forte articulation entre nos activités de recherche, le monde industriel et les préoccupations locales en matière de gestion de l'énergie. La politique du laboratoire, aujourd'hui dirigé par Patrick Hervé, (Professeur 60<sup>ième</sup> section), reste inchangée et continue à favoriser le développement de relations fortes entre le monde industriel et le laboratoire.

Les deux thématiques ont logiquement abouti à la création de deux équipes au sein du Laboratoire, l'équipe « Génie Civil Thermique de l'Habitat » (EGC-Th), dirigée par Harry Boyer (Pr. 60<sup>ième</sup> section) depuis 1994 et l'équipe « Analyse et Conduite de Transferts

Energétiques et des Systèmes » (A.C.T.E.S.) dirigée par Jean Daniel Lan Sun Luck (Pr. 63<sup>ème</sup> section).

Plus spécifique à l'équipe GC-Th dont je fais partie, l'implication dans le domaine de la thermique s'est traduite dans un premier temps par la réalisation d'ouvrages relatifs à la conception thermique en climat tropical par Gatina [Gatina 79], [Gatina 84]. Dans un second temps, plusieurs thèses ont été conduites sur des thèmes liés aux composants du bâtiment [Tourrand 91], [Tourrand 94] et à l'énergétique solaire [Mezino 85], [Vaxelaire 89]. Grâce à ces compétences acquises et devant l'évolution rapide de la puissance des micro-ordinateurs de type PC, l'étape suivante a consisté en une démarche de modélisation plus globale et a abouti au développement d'un code de simulation thermo-aéraulique de bâtiments en régime dynamique [Boyer 93]. Enfin, une fois le code réalisé, une phase de validation s'est avérée nécessaire.

Mes activités de recherche ont donc réellement débuté en 1994 lors du démarrage de ma thèse en convention CIFRE avec EDF Ile de la Réunion et le Laboratoire de Génie Industriel. Cette convention est arrivée à un moment où les intérêts universitaires et industriels convergeaient fortement dans la mesure où EDF était très demandeur de compétences en thermique du bâtiment et où l'Université de la Réunion pouvait répondre à cette demande par l'intermédiaire d'un outil de simulation du comportement thermo-aéraulique de bâtiment. Mon travail de thèse mené de 1994 à 1997 a porté essentiellement sur le développement d'une méthodologie de validation, sur la réalisation de supports expérimentaux et de la mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition permettant une comparaison mesure/modèle fiable. Un deuxième volet de mon travail a consisté à améliorer les modèles de systèmes de climatisation couplés au modèle global de bâtiment.

Après une année en tant qu'ATER en 1997, j'ai été ensuite recruté l'année suivante pour m'occuper principalement, dans la continuité de ma thèse, des activités de recherche relatives à la validation et aux systèmes de traitement d'air car le champ d'investigation était suffisamment large pour envisager une thématique à part entière au sein de l'équipe.

Parallèlement à cela, une autre mission demandée lors de mon recrutement était le pilotage du département Génie Civil de l'IUT de Saint-Pierre. Nous allons voir plus loin dans le mémoire que les deux actions (mise en place d'une activité de recherche pérenne autour de la validation et mise en place d'un département Génie Civil) ont pu être menées en parallèle en générant un environnement profitable à la fois à la recherche et à l'enseignement.

## 5.2 Fiche signalétique – LGI Equipe GC-Th

Depuis 1998, l'équipe Génie Civil s'est étoffée, comme le témoigne la fiche signalétique ci-après. Historiquement, j'ai été le troisième MCF recruté, après Harry Boyer et Florence Pignolet. La mise en place du département Génie Civil dans le sud de l'île depuis 1998 a généré trois supports d'enseignants chercheurs sur lesquels se trouvent Harry Boyer (Pr. 60) depuis la rentrée 2001, Laetitia Adelard (rentrée 1999) et moi même (rentrée 1998) et a délocalisé une partie de nos activités de recherche jusqu'ici limités au nord de La Réunion à Saint-Denis. Le chapitre 1 de la deuxième partie du mémoire traite de l'émergence de cet environnement recherche dans le sud et de sa complémentarité avec celui de Saint-Denis.

## Laboratoire de Génie Industriel – EAD 2524

### Equipe Génie Civil – Thermique de l'Habitat

|                            |  |  |
|----------------------------|--|--|
| Formations doctorales :    | Méthodes de conception en bâtiment et techniques urbaines, Energétique |  |
| Directeur du Laboratoire : | Patrick Hervé  | Professeur 60 <sup>ème</sup> section (UFR Sces)            |
| Responsable Equipe GC-Th : | Harry BOYER  | Professeur 60 <sup>ème</sup> section (IUT)                 |
| Membres :                  | Jean Claude GATINA   | Professeur 60 <sup>ème</sup> section (UFR Sces)            |
|                            | François GARDE   | Maître de conférences 60 <sup>ème</sup> section (IUT)      |
|                            | Laetitia ADELARD   | Maître de conférences 60 <sup>ème</sup> section (IUT)      |
|                            | Alfred Philippe LAURET   | Maître de conférences 60 <sup>ème</sup> section (UFR Sces) |
|                            | Anis YOUNES  | Maître de conférences 60 <sup>ème</sup> section (UFR Sces) |
|                            | Malik MAMODE   | Maître de conférences 61 <sup>ème</sup> section (UFR Sces) |
|                            | Thierry MARA   | Docteur, ATER (UFR Sces)                                   |
|                            | Franck LUCAS   | Doctorant (PRAG IUT)                                       |
|                            | Frédéric MIRANVILLE  | Doctorant MRES (moniteur IUT)                              |
| Eric FOCK                  | Doctorant (convention CIFRE EDF)                                       |  |

Mots clés : Thermique et énergétique des bâtiments, modélisation, systèmes, validation, conception thermique et aéraulique de bâtiments, énergies nouvelles et renouvelables.

#### Thématique de recherche :

Notre domaine initial de recherche est celui de la modélisation et simulation thermo-aéraulique des bâtiments et des composants associés (systèmes, parois complexes etc...). 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 de modèles globaux et élémentaires 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 aussi bien sur les aspects d'analyse de sensibilité que de la comparaison mesure/modèle.

Les aspects de thermique urbaine et par la suite de génération de données climatiques cohérentes à de 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 800 logements ont été construits en regard des prescriptions édictées à la suite d'un contrat de simulations sur des logements type, en partenariat avec la direction d'EDF Départements d'Outre Mer. 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 la période 1996-2001 :

- 19 publications dans des revues internationales à comité de lecture
- 27 communications dans des congrès internationaux avec actes
- 4 thèses soutenues
- 1.4 MF de contrats de recherche

#### Perspectives

De part notre approche pluridisciplinaire et une bonne maîtrise des problématiques liés au bâtiment et à l'environnement, les perspectives sont étendues. A court et moyen terme, les thèmes ont trait à la modélisation détaillée en thermique des bâtiments et des systèmes associés ainsi qu'à la validation de tels modèles. La modélisation d'indices de confort thermique spécifiques à nos climats, leur intégration à des codes de simulation et leur validation est également en cours. En terme de disciplines, les compétences spécifiques que nous développons actuellement sont celles de la mécanique des fluides appliquée aux écoulement dans l'habitat, de l'instrumentation spécifique et des énergies renouvelables appliquées au bâtiment. .

## 6 Activités d'encadrement et de recherche

### 6.1 Les activités de recherche

Comme cela a été énoncé plus haut, la conception thermique des bâtiments à la Réunion et dans les DOM en général n'est soumise à aucune réglementation. L'une des actions menées par les institutionnels dès le début des années 90 a consisté à promouvoir la conception thermo-aéraulique des bâtiments et l'utilisation d'outils d'aide à la conception à usage des architectes et des bureaux d'étude. Ces actions ont consisté entre autre au développement d'un projet de label concernant le logement neuf dans les DOM, baptisé « Opération expérimentale ECODOM ». Les enjeux économiques étaient et sont toujours importants pour EDF et L'île de La Réunion car le secteur du bâtiment représente une menace énergétique réelle. L'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat disposait d'un outil de simulation thermo-aéraulique de bâtiments développé en partenariat avec l'INSA de Lyon<sup>1</sup> qui, de part son caractère multizone et multimodèle, s'adapte parfaitement à la conception de bâtiments en climat tropical humide [Boyer 98]. Ce logiciel, baptisé CODYRUN n'avait été que partiellement validé par comparaison inter-logiciel, et seule une validation expérimentale a fourni les garanties quant à la fiabilité de l'outil informatique.

Mes travaux de recherche initiés en thèse (en convention CIFRE à EDF) et poursuivis jusqu'à ce jour se proposent de répondre à la fois aux attentes scientifiques (développement d'une méthodologie de validation, modélisation de systèmes de traitement d'air) et industrielles (mettre en place une procédure de labellisation pour améliorer la conception thermique des logements neuf dans les DOM et assurer le suivi technique de cette procédure). L'objectif à terme est de pouvoir utiliser un outil d'aide à la conception fiable permettant de donner un certain nombre de recommandations techniques sur les divers éléments architecturaux d'un bâtiment et de les classer par ordre d'intérêt technico-économique.

Les thèmes de recherche associés à mes travaux sont donc :

- *la validation de modèles thermo-aéraulique globaux et élémentaires de bâtiments ;*
- *la modélisation des systèmes de traitement d'air et du couplage bâtiment/système ;*
- *la conception thermo-aéraulique des bâtiments avec la diffusion d'outils d'aide à la conception à usage de la profession.*

---

<sup>1</sup> *Boyer, H. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles. Thèse : Sci., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1993. 248 p.*

### 6.1.1 Validation de codes de simulations thermo-aérauliques

Notre objectif a été de mettre en place une méthodologie de validation s'inscrivant dans la continuité d'une réflexion internationale initiée principalement par Ron Judkoff [Judkoff 83] [Judkoff 88]. Cette méthodologie s'appuie sur plusieurs étapes successives dont les plus importantes sont l'analyse de sensibilité et la validation expérimentale. Il s'est donc avéré nécessaire de constituer des supports expérimentaux à échelle 1 et d'acquérir des compétences en instrumentation dont ne disposait pas l'équipe Génie Civil.

A partir de deux supports expérimentaux (un habitat réel en grandeur nature [Garde 96a] et une cellule expérimentale baptisé cellule LGI), une première confrontation des prédictions aux mesures de deux modèles d'enveloppe a été réalisée en environnement naturel [Garde 95]. Dans les deux cas, nous avons mis en place un dispositif complet d'acquisition de données reposant sur la mesure des paramètres climatiques sur le site et sur la mesure des grandeurs liées à l'habitat et permettant une comparaisons avec le modèle (températures d'air intérieure, températures résultante, températures de surfaces, hygrométries intérieures).

La comparaison mesure/modèle a été effectuée en ayant recours aux techniques de traitement du signal (Densité Spectrale de Puissance, cohérence des signaux entrées/sorties), de manière à mettre en évidence les données météorologiques corrélées au résidu afin de remonter à l'origine de l'erreur et éventuellement d'apporter des corrections au niveau du modèle. Une application dédiée à la validation des codes de simulation de bâtiments sous environnement MATLAB a été développée spécifiquement [Mara 98]. Nous avons par cette méthode mis en évidence une erreur de modélisation au niveau de la température du ciel, paramètre qui influe grandement sur le confort dans l'habitat en climat tropical humide [Adelard 98b]. Par contre, la méthode a montré ses limites quand les entrée étaient corrélées entre elles (par exemple, les données météorologiques).

Les travaux liés à la validation ont été poursuivis et étendus notamment aux procédures de comparaison inter-modèle et à l'étude de la sensibilité des modèles. Nous avons soumis CODYRUN à la procédure BESTEST (standard international en matière de comparaison inter-modèle issu de la Task 12 Annexe 21 de l'IEA). Cette procédure, mise au point par Judkoff et Neymark [Judkoff 95], a pour but de comparer le modèle que l'on souhaite valider à des codes de références (DOE-2, ESPr, BLAST) sur des cas simples de bâtiments. BESTEST a notamment permis d'identifier certaines erreurs de programmation [Soubdhan 99], [Mara 00a]. Une méthode originale d'analyse de sensibilité basée sur l'analyse spectrale a ensuite été proposée. Cette méthode outre l'aspect sensibilité permet l'approximation du modèle étudié par un polynôme de régression encore appelé surface de réponses ou métamodèle [Mara 01b]. Développée sous environnement MATLAB, elle permet l'identification des paramètres les plus influents sur les sorties du modèle ; ce qui facilite l'identification de l'erreur de modélisation provenant d'une mauvaise estimation de paramètres. La méthode a été appliquée à CODYRUN [Mara 00b] pour l'optimisation du modèle d'enveloppe de la cellule LGI. Les procédures de comparaison mesure/modèle ont été améliorées également grâce à l'analyse temps-fréquence qui permet parfois de différencier les variables corrélées [Abelard 99], [Mara 00] et ont été appliquées avec succès au modèle d'enveloppe de la cellule LGI [Mara 01a]. Le



d'enveloppe de la cellule LGI [Mara 01a]. Le chapitre 2 de la partie relative au développement des activités de recherche fera une synthèse des méthodes qui ont été mises en place au sein de l'équipe et présentera également les travaux en cours.

En ce qui concerne les supports expérimentaux, la nécessité de développer de nouveaux supports est apparue relativement rapidement, au regard des besoins de validation de modèles et des domaines de validation toujours plus importants au sein de l'équipe. Aussi, le développement du site de l'IUT de Saint-Pierre dont j'avais la responsabilité est arrivé à point nommé pour mettre en place une plate-forme expérimentale en environnement naturel et contrôlé. La partie en environnement naturel est constituée de cellules à échelle réduite permettant l'étude de composants de toiture et de la cellule LGI qui a été déplacée sur le site, le tout occupant une surface de 250 m<sup>2</sup>. La plate-forme en environnement contrôlé, baptisée STA-Tron est dédiée à la validation de modèles de systèmes de traitement d'air. Elle est constituée de deux enceintes adiabatiques permettant de tester les climatiseurs en régime dynamique et permanent. Cette plate-forme unique dans les départements d'Outre-mer est décrite de manière détaillée dans le chapitre 1 de la partie « Développement des activités de recherche ». Son financement provient pour la majeure partie de contrats de recherche dont j'avais la responsabilité (voir Annexe C : Financements).

L'élaboration et l'instrumentation d'un support expérimental tel que la plate-forme de l'IUT nous permettent de disposer d'un outil performant au niveau de la qualité des mesures. De plus, le caractère modulable et évolutif de celle-ci, la présence de systèmes actifs ouvrent le champ à de futures expérimentations dans le cadre de la validation de modèles thermiques du bâtiment, aussi bien en environnement passif qu'en environnement actif et même pour l'étude à terme des échanges thermiques et aérauliques multizones (il est en effet prévu une extension de la cellule LGI en un bâtiment bizona). En outre, les bases de données expérimentales de qualité qui seront constituées pourront être échangées et utilisées par d'autres équipes de recherche.

Nous avons à ce sujet établi de solides liens avec le Groupe modélisation physique des bâtiments de la Division Recherche et Développement d'EDF qui sont fortement impliqués au niveau international dans la démarche de validation. Des comparaisons CODYRUN/CLIM 2000 (logiciel de simulation thermo-aéraulique d'EDF) avec des fichiers expérimentaux issus des cellules ETNA (cellules expérimentales en environnement naturel localisées au Nord de la France) ont été réalisées dans le cadre de la thèse de Thierry Mara.

Par ailleurs, nous allons prochainement intégrer le groupe de travail international de la Task 22 de l'Agence Internationale de l'Energie (I.E.A.) travaillant sur l'amélioration des outils énergétique de bâtiments. L'une des sous-tâches de la Task 22 concerne la validation expérimentale de logiciels et la mise en place d'une nouvelle procédure de comparaison inter-modèle baptisée HVAC BESTEST concernant le couplage système/bâtiment. Notre participation consistera en la mise à disposition de données expérimentales sur des protocoles qui seront définis lors de la prochaine réunion du groupe en février 2002.

### 6.1.2 Modélisation des systèmes de traitement d'air

Nos travaux ont également porté sur la modélisation de systèmes de climatisation, et plus particulièrement les systèmes de climatisation individuelle, appelés à se développer dans les DOM. Ces systèmes sont souvent sur-dimensionnés par rapport aux besoins réels et leur modélisation est souvent imparfaite, les modèles horaires habituellement utilisés étant mal adaptés car ne tenant pas compte de la régulation et du cyclage des appareils. Plusieurs modèles à pas de temps réduits (et à différents niveaux de finesse) ont été développés et comparés à un modèle horaire classique [Boyer 98], [Adelard 00], [Garde 97].

Nous avons instrumenté de manière complète un split-système couplé à la cellule expérimentale décrite précédemment, et automatisé toute la chaîne d'acquisition (mesure des paramètres climatiques, des paramètres liés à l'enveloppe et des grandeurs liées au système telles que puissance sensible, puissance latente et puissance électrique) [Lucas 97].

Les premiers résultats issus à la fois de comparaisons expérimentales mais également de comparaison inter-modèles montrent que les modèles à pas de temps réduits sont de bien meilleurs indicateurs pour la prédiction des consommations énergétiques, surtout lorsque le système étudié régule de manière importante [Garde 01b]. Le modèle horaire gagne en précision lorsque le système régule peu. La précision des différents modèles pour des taux de marche variables a également été étudiée [Garde 99].

Les travaux liés à la modélisation des systèmes et à une meilleure prise en compte des transferts d'humidité ont été poursuivis tout d'abord dans le cadre d'un DEA [Lucas 96], puis d'une thèse qui est sur le point d'être soutenue (voir thèse de Franck Lucas dans la partie « Encadrement de doctorants ). Nous nous sommes intéressés à la modélisation du couplage enveloppe/système en proposant un modèle adimensionnel permettant de prendre en compte le comportement de systèmes en régime transitoire et en régime permanent [Garde 01e].

Le couplage du modèle à un code de simulation thermo-aéraulique de bâtiment a permis de déterminer au pas de temps de l'heure le temps de marche et le temps de cycle du système, les puissances frigorifiques totale, sensible et absorbée fournies à l'ambiance ainsi que l'évolution de l'humidité dans la zone climatisée (le système régule seulement sur la température d'air et l'humidité est laissée en évolution libre). L'algorithme proposé s'applique à tout code de simulation de bâtiment capable de déterminer les besoins sensibles pour une consigne donnée. La méthode est présentée dans le chapitre 3 du mémoire et fait également l'objet d'une publication soumise à l'ASHRAE.

Une confrontation expérimentale modèle/mesure à l'aide de la cellule LGI a été conduite. Les travaux futurs vont concerner une meilleure approche dans l'équation liée à l'évolution de l'humidité spécifique et au fonctionnement de la batterie froide dans le local modélisé. En effet, comme les puissances frigorifiques et le temps de marche dépendent de l'humidité, il s'agit d'une variable importante sur laquelle nos efforts vont converger pour améliorer la précision de nos résultats. Il paraît évident qu'une campagne de mesures plus complète est indispensable. Cette campagne portera à la fois sur la cellule LGI en environnement naturel pour l'étude des couplages système/enveloppe mais également sur le STA-Tron en environnement contrôlé pour l'étude plus spécifique du processus de déshumidification/humidification au niveau de l'évaporateur en régime transitoire.

### 6.1.3 Application à la conception thermo-aéraulique des bâtiments

L'implication de notre équipe sur le thème de la conception thermo-aéraulique a débuté lors de l'établissement de la convention CIFRE [Garde 97a], puisque j'avais en charge le pilotage de l'opération expérimentale ECODOM aussi bien sur les aspects scientifiques qu'administratifs. Les aspects administratifs étant décrits dans la troisième partie du mémoire, nous nous consacrerons ici aux aspects purement scientifiques.

L'élaboration de l'opération expérimentale ECODOM a reposé sur trois phases :

1. Réalisation d'un document de référence contenant des prescriptions simples et pédagogiques portant sur les divers constituants de l'enveloppe du bâtiment (de 1995 à 1997) ;
2. Validation des prescriptions par un suivi expérimental et sociologique sur les premiers projets ECODOM, retour d'expérience (1998-99);
3. Application de ces prescriptions ECODOM sur des opérations de logements neufs (à partir de 1997 jusqu'à encore aujourd'hui).

La mise en place du document de référence ECODOM a pris deux années (de 1995 à 1997). Il a fallu tout d'abord identifier les parties du bâtiment à étudier. Les étapes de validation du logiciel ayant été réalisées, nous avons pu utiliser CODYRUN pour l'établissement de règles constructives destinées à améliorer la conception thermique des bâtiments. Notre démarche a consisté à étudier plusieurs logements représentatifs des habitudes locales de construction (logement individuel et collectif). L'ensemble de simulations effectuées sur des logements représentatifs nous ont conduit à définir des solutions techniques passives performantes pour chaque composant de l'enveloppe (toiture, paroi opaque, vitrages), ainsi qu'un ratio minimal de perméabilité de façades pour optimiser la ventilation naturelle. Ce travail a fait l'objet d'un rapport de recherche (convention EDF Direction des DOM et Université de la Réunion [Garde 96b]) qui regroupe les résultats de nos simulations tant au point de vue des gains en confort que des gains énergétiques. Les travaux ont été présentés dans [Garde 97b] et [Garde 99] et au niveau national dans [Garde 00c].

Les solutions passives ont ensuite été éditées dans un document de référence [Célaire 97] après de nombreuses concertations avec des groupes de travail locaux et nationaux (constitués d'architectes, d'universitaires et de professionnels du bâtiment) sur l'aspect pédagogique et sur la présentation des résultats. Ce document sert depuis 1997 de base de travail pour la conception des nouvelles opérations de logements neufs dans les DOM.

Une phase de suivi expérimental et sociologique des logements a ensuite été réalisée pour les premières opérations ECODOM, de manière à valider expérimentalement l'impact des solutions sur le confort des occupants. Cette phase de suivi s'est faite dans le cadre d'une convention de recherche entre l'Etat et l'Université de la Réunion (voir Annexe A : rapports de recherche). La stratégie adoptée visait à instrumenter finement (suivi horaire) un nombre restreint mais représentatif de logements sur deux opérations différentes. Les campagnes de mesures ont été réalisées pendant les saisons chaudes de 1998 et 1999. Elles ont porté à la fois sur des logements non occupés et sur des logements occupés. A l'aide de différents scénarii,

l'objectif était de tirer des conclusions probantes quant à la pertinence et à la quantification des performances thermiques des logements et d'effectuer in fine un retour sur les prescriptions du label. Le suivi expérimental a mis en évidence l'importance de la protection solaire de la toiture, des baies et de la ventilation naturelle. Les résultats ont été présentés dans plusieurs rapports de recherche [Garde 98], [Garde 00a] et [Garde 00b]. L'enquête sociologique nous a permis de confirmer certains résultats du suivi expérimental, notamment sur la protection solaire de la toiture et de la ventilation naturelle.

A l'heure actuelle, c'est à dire au courant de l'année 2001, une douzaine d'opérations de logements collectifs ont été labellisées à l'Île de la Réunion (soit 500 logements neufs) en suivant les prescriptions issues de nos travaux de recherche. Le même nombre de logements a été également labellisé en Guadeloupe. Par ailleurs, le document de référence ECODOM est intégré dans le programme de construction de nouveaux lycées et sert de base de travail pour la conception de salles de classe d'établissement scolaires. On assiste donc depuis quelques mois à une diffusion progressive du savoir chez les maîtres d'ouvrage et les architectes et à une prise de conscience générale des questions relatives à la thermique du bâtiment. La principale raison de ce succès vient une fois de plus de la simplicité et de la pédagogie de l'outil proposé.

Au final, l'intérêt de notre travail est d'avoir pu faire évoluer le logiciel CODYRUN par les étapes de validation, développement et application. Il est extrêmement satisfaisant pour les physiciens du bâtiment que nous sommes de conjuguer à la fois les aspects de recherche et de conception et d'apporter notre contribution à l'amélioration de la conception thermique des bâtiments. L'implication forte de notre équipe sur cette thématique nous a donc été profitable sur différents aspects universitaires et professionnels.

Nous avons au travers du développement d'ECODOM acquis une reconnaissance locale et même nationale dans le domaine de la conception thermique et nous nous positionnons en tant qu'acteurs du développement local de La Réunion.

Cette reconnaissance locale s'est traduite par de nombreux contrats de recherche dont les plus importants sont [SODEGIS 00], [SPIOM 99], de nombreux contrats d'appui technique ECODOM (voir Annexe A) et plus récemment le projet d'IUT Site Pilote en Energies Renouvelables (qui sera présenté dans la partie « Perspectives »). La réalisation de ces contrats nous permet d'auto financer la plate-forme expérimentale présentée dans le chapitre 1. Loin de nous substituer aux bureaux d'études, notre volonté est de transférer la connaissance issue de la recherche vers les pratiques professionnelles et de participer de manière active à l'analyse des projets ECODOM en accompagnant l'architecte dès la phase esquisse jusqu'à la réalisation du projet. La thématique traitant du problème de l'utilisation d'outils simplifiés à usage de la profession et d'« approche globale » est au cœur de réflexions internationales ; notre équipe s'est illustrée par un nombre conséquent de publications sur le thème [Garde 99], [Garde 01a]. Le chapitre 4 du mémoire expose une réflexion sur cette thématique issue de l'expérience acquise par notre équipe sur les 7 dernières années. Il est à noter que le texte a été accepté récemment à la revue *Energy and Buildings* [Garde 01c].

Par ailleurs, le suivi expérimental effectué sur des logements réels a permis de constituer de nouvelles bases de données que nous avons utilisé pour la validation de CODYRUN,

notamment pour la validation des modèles en pression [Boyer 99], des modèles de transferts radiatifs [Lauret 01] ou des outils simplifiés [Garde 01d].

Notre équipe s'implique fortement dans toutes les instances traitant des économies d'énergie de conception et de confort thermique. Cette implication a abouti concrètement au recrutement de l'un de nos étudiants dans le cadre d'une nouvelle convention CIFRE avec EDF (voir Thèse d'Eric Fock dans la partie encadrement doctoral).

Enfin, le développement de logements ECODOM a permis de développer certains matériaux ou procédés constructifs qui jusqu'alors étaient peu utilisés en climat tropical. Nous pensons notamment aux Produits Minces Réfléchissants (PMR) dont les propriétés radiatives faiblement émissives sont censées réfléchir le rayonnement grande longueur d'onde sous les toitures. Ce type de matériau ayant été peu testé en climat tropical, il nous a semblé judicieux de débiter une thèse sur le sujet portant à la fois sur une instrumentation fine de ce type de complexe de toiture et sur une modélisation de la paroi en vue de l'intégration future dans un code de calcul. Ces travaux sont actuellement réalisés dans le cadre d'une bourse MRT (voir thèse de Frédéric Miranville dans la partie encadrement doctoral).

#### 6.1.4 Perspectives et travaux en cours

Nous avons au cours des dernières années mis en place un environnement scientifique conséquent permettant de continuer nos thématiques initiales. En ce qui concerne mes travaux de recherche, les trois thématiques précitées vont être poursuivies à court et moyen terme. Les supports expérimentaux en environnement contrôlé et naturel vont nous permettre de poursuivre le développement et la validation de modèles en thermique du bâtiment et de leurs systèmes associés en participant de manière active aux réflexions internationales sur le sujet.

Notre implication dans les domaines liés à l'utilisation d'outils simplifiés à usage de la profession va également se poursuivre. Les travaux en cours concernent une évolution d'ECODOM vers un label à point. Il s'agira de définir des niveaux de performance en fonction de zones géographiques (ventée/non ventées), des composants du bâtiment (isolation, protection solaire), le niveau minimal devant être le niveau réglementaire actuellement en cours de réflexion. Une note de synthèse a été rédigée proposant une méthode de travail [Garde 00c].

Concernant nos activités de modélisation, nous avons souhaité faire un recentrage du développement de nos modèles autour de l'environnement CODYRUN et TRNSYS-EES [TRNSYS 97], [EES 01]. CODYRUN reste bien évidemment un code à part entière en constante évolution et maintenu par Harry Boyer ; il nous est toutefois paru opportun de relier CODYRUN à l'environnement TRNSYS. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un DEA [Bastide 01] (voir encadrement doctoral) et a abouti à la réalisation du type 59 (version de CODYRUN sous TRNSYS). Les résultats ont été récemment présentés aux dernières journées TRNSYS francophones [Bastide 01b].

Enfin, de nouveaux champs d'exploration s'ouvrent à nous : celui du confort thermique et des énergies nouvelles et renouvelables. La Région Réunion nous en effet sollicité pour que nous développions ces axes de recherche. Au regard des activités de l'équipe et soucieux de garder notre politique de recherche proche des préoccupations locales, il nous a semblé judicieux d'entamer une réflexion sur ces thématiques.

Le confort thermique dans les logements ou les bâtiments ventilés naturellement est un enjeux énergétique important pour La Région Réunion. En effet, nous sommes en plein débat sur la mise en place d'un calendrier scolaire climatique et le problème de la climatisation des salles de classe est au cœur des réflexions actuelles. D'un point de vue universitaire, nous nous sommes consacrés pendant de nombreuses années à la modélisation des transferts thermo-aérauliques dans le bâtiment. Il ne faut pas perdre de vue que la finalité d'un bâtiment est d'assurer le confort des individus. De ce fait, il nous semble intéressant d'orienter une partie de nos travaux sur l'étude du confort en climat tropical et de la simulation numérique des écoulements dans les bâtiments à l'aide d'un code CFD. En effet, l'un des paramètres du confort est la vitesse d'air. Les codes de modélisation simplifiés CODYRUN ou TRNSYS donnant seulement les débits aérauliques inter-zones, seul un code CFD permet d'avoir une répartition spatiale des vitesses dans le logement. Deux DEA ont traité dernièrement de ces sujets [Vienne 01], [Bastide 01]. Les travaux doivent normalement se poursuivre dans le cadre d'une bourse régionale d'allocation doctorale.

Un autre axe voulu par La Région est le développement des énergies renouvelables. La volonté politique s'est traduite par la création récente de l'Association Réunionnaise des Energies Renouvelables (ARER). Notre souhait est le développement de modèles de systèmes de production de l'énergie basés sur les énergies renouvelables et la validation des modèles couplés au bâtiment. L'environnement TRNSYS et l'intégration récente de CODYRUN pour la modélisation des charges du bâtiment est tout à fait adapté à ce genre d'étude. Le récent projet IUT « Site pilote en énergies renouvelables » mené en partenariat avec l'ARER permettra d'initier cette démarche. Notre objectif est de faire du site de l'IUT une vitrine technologique à usage d'enseignement et de recherche. L'implantation des locaux de l'ARER au sein de l'IUT traduit cette volonté commune de développer cette nouvelle thématique. Nous avons récemment obtenu un financement Région/Europe de 5.9 MF pour développer cet axe de recherche. Le chapitre 5 du mémoire exposera en détail le projet de recherche que nous comptons mener.

### 6.1.5 Synthèse

La Figure 1 synthétise l'ensemble de mes activités de recherche qui ont été menées jusqu'à présent. Nous retrouvons les trois thématique initiales (validation, développement de modèles de systèmes de traitement d'air et conception thermique des bâtiments) et les nouvelles thématiques qui en ont découlé (PMR, transferts hydriques, confort, CFD et ENR).

L'organisation de ces activités est volontairement sur un axe descendant car la finalité de nos recherches reste le transfert de nos connaissances universitaires vers les pratiques professionnelles, avec un retour d'expérience souhaité pour améliorer nos outils et permettre une communication plus grande entre le monde de la recherche et celui de l'industrie.

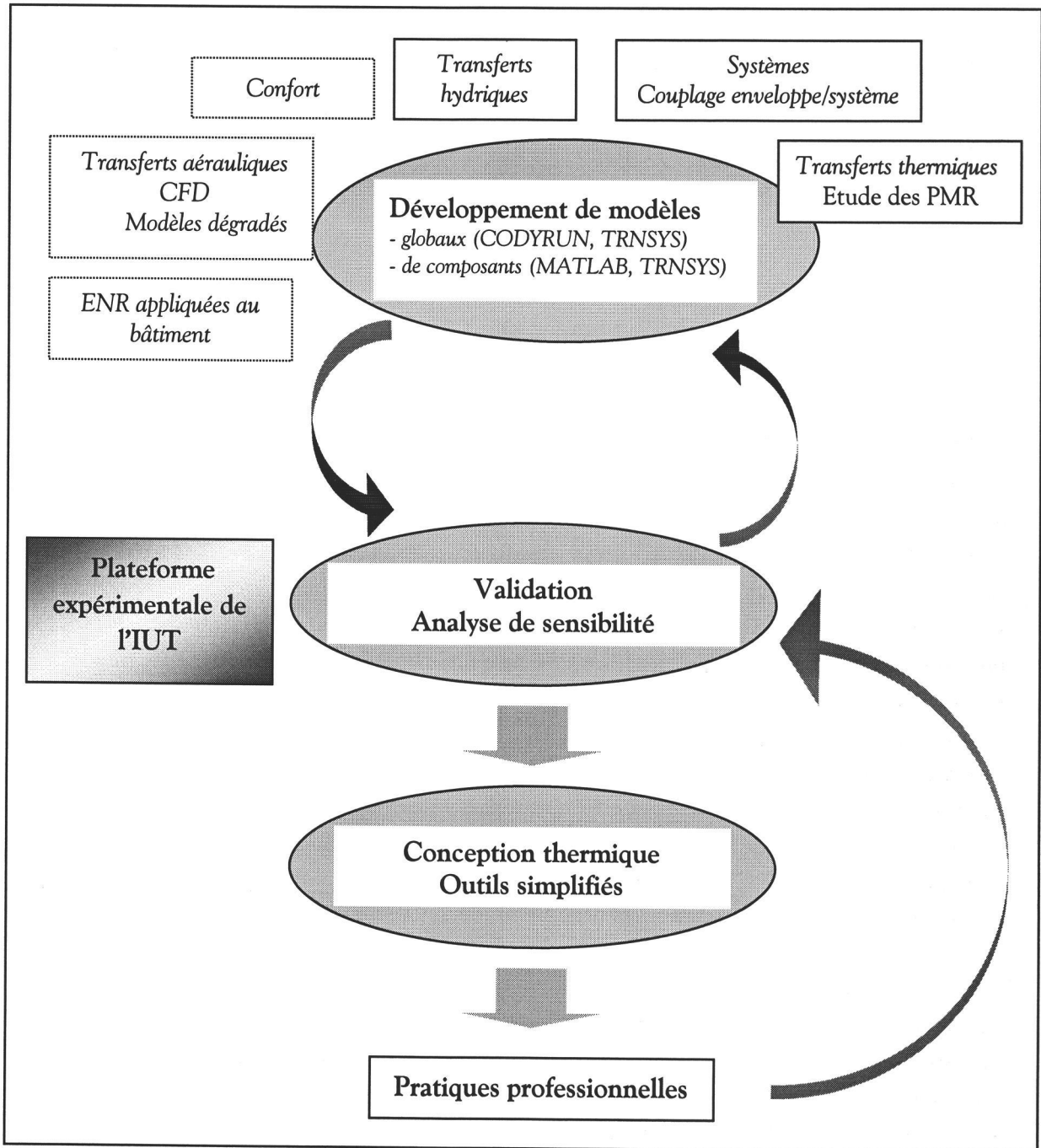


Figure 1 : Synthesis des activités de recherche.

## 6.2 Les activités d'encadrement

Cette section décrit les activités d'encadrement effectuées au sein de l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat depuis la fin de ma thèse. La Figure 2 à la fin de la section illustre de manière synthétique l'enchaînement temporel de mes activités.

### 6.2.1 Au niveau de l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat

Mon expérience professionnelle initiale couplée à mes activités de recherche ont permis à l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat d'acquérir de nouvelles compétences dans des domaines tels que la validation expérimentale de modèles, l'expertise thermique et les diagnostics énergétiques sur des bâtiments actuels ou futurs. Nous avons également une forte implication dans le suivi énergétique des bâtiments et de l'instrumentation associée.

Notre situation insulaire, associée à un choix délibéré d'intégrer nos travaux au milieu local et les besoins générés par la croissance rapide des effectifs de l'équipe nous ont fortement incité à nous investir dans des contrats industriels. Ces compétences se sont traduites par la réalisation de nombreux contrats de recherche avec des partenaires locaux (Conseil Régional, Conseil Général, EDF Ile de La Réunion, ADEME, Maîtres d'ouvrage sociaux, BET, DDE) et nationaux (EDF Direction des DOM, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Ministère du logement). L'ensemble des contrats de recherche ainsi que les rapports associés sont listés en annexe.

Mes principales responsabilités au sein de l'équipe sont les suivantes :

- Montage, suivi scientifique et gestion financière des conventions et contrats de recherche, en collaboration avec le responsable d'équipe Harry Boyer.
- Mise en place de l'environnement recherche à l'IUT de Saint-Pierre : la création du département Génie Civil a généré trois supports d'enseignants chercheurs et un support d'ATER. Deux doctorants (Franck Lucas et Frédéric Miranville) mènent leurs travaux de recherche sur le site de l'IUT.
- Gestion des dépenses et recettes (achats de matériels, missions etc...) pour l'équipe de recherche ; une partie des contrats de recherche a en effet été délocalisée à l'IUT de Saint-Pierre pour des raisons de facilité de gestion.
- Montage, suivi financier et scientifique du dossier « IUT Site Pilote en Energies Renouvelables », en collaboration avec l'ADEME, l'ARER et La Région Réunion (5.9 MF).
- Demandes de financements de projets de recherche (Etat, collectivité, ADEME etc...).
- Participation à la définition et aux demandes de financement des sujets de thèses.
- Elaboration de la politique de recherche de l'équipe : nous avons récemment rédigé un document exposant les activités de recherche, les compétences et la politique de recherche de l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat [Garde 01h]. Ce rapport a été présenté aux partenaires institutionnels et a abouti à la définition de nos nouvelles thématiques de recherche (confort et ENR) et à leur appui financier par La Région.
- Relation avec le monde industriel.
- Participation au groupe de travail de la Task 22 de l'IEA.



## 6.2.2 Encadrement de doctorants et d'étudiants

En terme d'encadrement doctoral, j'ai personnellement encadré 5 étudiants de DEA et participé à l'encadrement de 4 thèses. Les encadrements de thèse ont été sous la responsabilité successive de Jean Claude Gatina et Harry Boyer (Professeurs 60<sup>ème</sup> section CNU).

L'ensemble des sujets de DEA et thèse sont directement issus de mes activités de recherche.

Les 2 premiers DEA encadrés lors de ma thèse (Thierry Mara et Franck Lucas) ont eu à traiter des sujets relatifs respectivement à la validation et à la modélisation des systèmes de traitement d'air [Mara 96], [Lucas 96]. Les deux sujets se sont poursuivis en thèse sur les même thématiques. Thierry Mara a bénéficié à ce titre d'une bourse régionale d'allocation doctorale; Franck Lucas a auto-financé sa thèse. La description de mes activités de recherche renseigne sur les travaux réalisés précisément par les deux doctorants, aussi je ne reviendrai pas sur ce point.

Thierry Mara a soutenu sa thèse en décembre 2000 et est actuellement ATER à la faculté des Sciences et Technologies à Saint-Denis [Mara 00]. Franck Lucas est sur le point de soutenir sa thèse sur le « Développement et la validation des échanges thermo-hydriques dans les bâtiments; influence de la condensation sur les systèmes de traitement d'air » (soutenance prévue pour le 17 décembre 2001) et est actuellement enseignant au département Génie Civil de l'IUT de Saint-Pierre.

Le troisième étudiant de DEA, Frédéric Miranville a participé à la mise en place de la plate-forme expérimentale [Miranville 99], [Miranville 00c]. Ses travaux se poursuivent dans le cadre d'une bourse nationale d'allocation doctorale avec l'étude des PMR dont nous avons parlé précédemment, en traitant aussi bien les aspects liés à la modélisation (sous environnement TRNSYS et MATLAB) que ceux liés à la validation expérimentale de modèles et à l'analyse de sensibilité). Certains résultats ont déjà été publiés dans des colloques internationaux [Miranville 00b] et nationaux [Miranville 00a].

Enfin, les relations pérennes établies avec EDF ont permis le recrutement d'Eric Fock en convention CIFRE en avril 2000. Son sujet de thèse concerne la modélisation hybride des transferts thermo-aérauliques dans le bâtiment et des systèmes de climatisation. A ce titre, une publication traitant de la comparaison de modèles de systèmes comportementaux et neuronaux a déjà été publiée dans Renewable Energy [Fock 00].

Enfin, les deux derniers sujets de DEA encadrés récemment (septembre 2001) ont traité les sujets relatifs au confort [Vienne 01], à la mise en place d'une soufflerie numérique à l'aide d'un code de champ et à l'implémentation de CODYRUN dans l'environnement TRNSYS [Bastide 01]. Nous avons de bonnes raisons de penser qu'Alain Bastide va poursuivre sur ce thème dans le cadre d'une bourse régionale d'allocation doctorale à compter de fin octobre 2001.

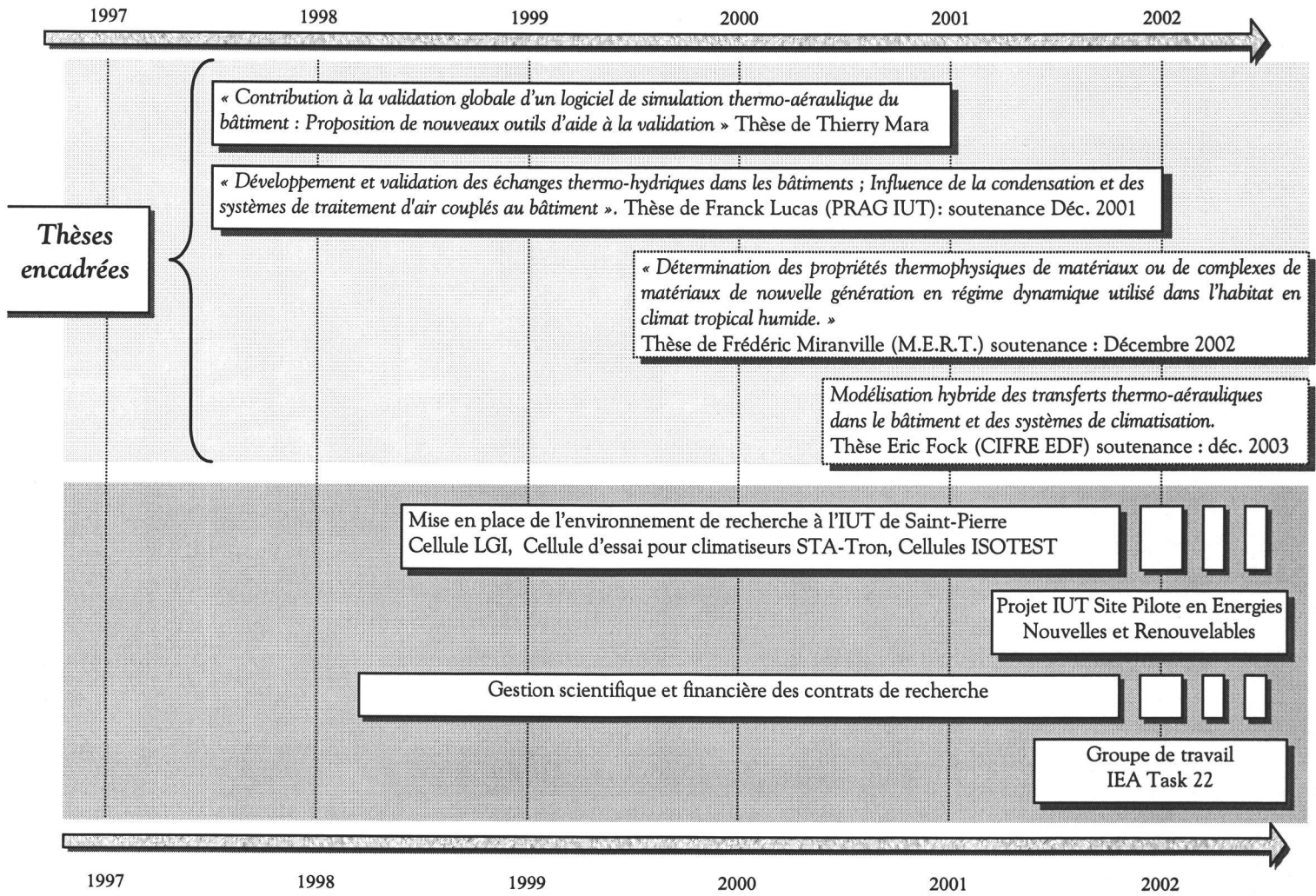


Figure 2 : Synthèse des activités d'encadrement au sein de l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat.

# 2<sup>ème</sup> Partie

## Développement des activités de recherche.

### Chapitre 1

**Mise en place d'un environnement recherche à l'IUT de Saint-Pierre**

### Chapitre 2

**Etat d'avancement de nos travaux en matière de validation**

### Chapitre 3

**Développement d'un modèle adimensionné de système de traitement d'air. Prise en compte du régime permanent et dynamique.**

### Chapitre 4

**Le transfert de connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles - Le cas de la conception thermique des bâtiments en climat tropical**

### Chapitre 5

**Perspectives**

## Chapitre 1

# Mise en place d'un environnement recherche à l'I.U.T. de Saint-Pierre

*Dans le cadre de mes activités de recherche, un environnement dédié à la thermique du bâtiment a été mise en place à l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Pierre.*

*Son ambition est de permettre une meilleure connaissance du comportement thermique du bâtiment et de ses composants, qu'ils soient actifs ou passifs et de valider les modèles globaux et de composants développés par l'Equipe Génie Civil Thermique de l'Habitat.*

*Nous présenterons dans un premier temps les raisons d'une délocalisation de nos activités de recherche, jusqu'ici limités au nord de La Réunion à Saint-Denis.*

*L'environnement de recherche mis en place à l'IUT sera décrit plus spécifiquement. Nous parlerons à la fois des moyens matériels avec la plate-forme expérimentale, mais aussi des moyens humains et financiers.*

*Les retombées en terme de contrats et de publications seront enfin exposées en guise de conclusion de ce chapitre.*

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Pourquoi un environnement recherche dans le Sud de La Réunion</b>  | <b>27</b> |
| 1.1      | Perspective de développement de l'Université de La Réunion dans le sud.....   | 27        |
| 1.2      | Le développement de la filière universitaire liée au Génie Civil.....   | 27        |
| 1.3      | La nécessité de continuer les activités de recherche liées à la validation .....  | 28        |
| <b>2</b> | <b>Rappel sur la validation et les supports associés.....</b>   | <b>30</b> |
| 2.1      | Rappel bibliographique sur les supports expérimentaux en environnement naturel et contrôlé .....  | 30        |
| 2.2      | Les supports expérimentaux utilisés pour notre code de simulation (période 1995-1997).....  | 32        |
| <b>3</b> | <b>Nécessité de développer de nouveaux supports expérimentaux.....</b>  | <b>34</b> |
| 3.1      | La problématique des Produits Minces Réfléchissants (PMR) .....   | 35        |
| 3.2      | Amélioration de la validation des modèles thermo-hydrauliques en climatisation passive et active .....  | 36        |
| 3.3      | Les avantages du site de Terre Sainte .....   | 39        |
| <b>4</b> | <b>La plate-forme expérimentale de l'IUT.....</b>   | <b>40</b> |
| 4.1.     | Introduction .....  | 40        |
| 4.2      | Plateforme expérimentale en environnement naturel.....  | 40        |
| 4.3      | La cellule d'essai en environnement contrôlé : Le STA-tron (cellule d'essai pour climatiseurs individuels et étude des phénomènes de condensation dans l'habitat) ..... | 49        |
| <b>5</b> | <b>Moyens.....</b>  | <b>54</b> |
| 5.1      | Moyens matériels et mode de financement .....   | 61        |
| 5.2      | Moyens en surfaces de recherche à l'IUT.....  | 62        |
| 5.3      | Moyens Humains.....   | 63        |
| <b>6</b> | <b>Autres supports en environnement naturel .....</b>   | <b>54</b> |
| 6.1      | Introduction .....  | 54        |
| 6.2      | Sites de La Trinité et de La Découverte, Ile de La Réunion (suivi expérimental de l'opération expérimentale ECODOM) .....   | 54        |
| 6.3      | Site de l'Entre Deux et du Tampon, Ile de La Réunion.....   | 56        |
| 6.4      | Site du Moule :Opérations SEMSAMAR et SAMIDEG Guadeloupe.....   | 57        |
| <b>7</b> | <b>Retombées en terme de publications .....</b>   | <b>64</b> |
| <b>8</b> | <b>Conclusion et perspectives.....</b>  | <b>65</b> |

# **1 Pourquoi un environnement de recherche dans le Sud de La Réunion**

## **1.1 Perspective de développement de l'Université de La Réunion dans le sud de l'île**

Tout d'abord, comme nous l'avons déjà dit dans la première partie, l'Université de La Réunion est une université en plein développement. En effet, l'effectif étudiant actuel se situe aux environs de 11 000 étudiants à la rentrée 2001 et les prévisions de l'INSEE prévoient un doublement des effectifs étudiants d'ici 2020 [TER 00]

La stratégie de l'UR est donc claire : il s'agit de doubler les capacités d'accueil actuelles et donc d'étendre la surface des bâtiments disponibles sur les vingt ans à venir.

A l'heure actuelle, l'Université dispose de cinq sites. Trois de ces sites sont localisés dans le Nord (Moufia, CERF et Victoire) et deux dans le Sud (le Tampon et Terre Sainte à Saint-Pierre). Parmi les sites à fort potentiel figurent le CERF et le site de Terre-Sainte à Saint-Pierre où est implanté le nouveau bâtiment de l'IUT depuis 1998.

L'UR souhaite délocaliser dans le sud de l'île et particulièrement sur le site de Terre-Sainte toutes les filières à connotation technologique forte ; c'est la raison qui explique l'implantation de l'IUT sur ce site. Actuellement, celui-ci possède deux départements : le département Gestion des Entreprises et des Administrations (existant depuis 1994) et le département Génie Civil (depuis la rentrée 1998). L'IUT va ouvrir deux départements supplémentaires à compter de la rentrée 2004 : le département Génie des Télécommunications et Réseaux (G.T.R.) et le département Génie Biologique Option Agroalimentaire.

Ainsi que le prévoit le contrat de plan Etat Région, le site de Terre Sainte ouvrira un cinquième et un sixième département au sein de l'IUT à l'horizon 2006. Une unité de restauration du CROUS, des logements étudiants et un bâtiment délocalisé de la faculté des Sciences et Technologies (qui devrait accueillir le futur IUP Génie Civil) sont également prévus.

## **1.2 Le développement de la filière universitaire liée au Génie Civil**

Le secteur du bâtiment et des travaux publics est le premier employeur au niveau national et l'un des plus importants à La Réunion. Il est actuellement en forte expansion tant au niveau national qu'au niveau local avec l'émergence de grands projets tels que l'autoroute des Tamarins (projet de 4 voies destiné à relier le nord avec le sud), le développement des logements locatifs sociaux (9000 logements par an), la systématisation dans les nouveaux projets de construction de la prise en compte des contraintes de qualité, d'environnement, d'économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables.

A l'heure actuelle, les formations proposées à l'Université dans le domaine du Génie Civil sont le DUT Génie Civil, la licence professionnelle « Gestion et Conduite de Projet » (habilitée depuis septembre 2001 à l'IUT de Saint-Pierre) et le DEA de Mécanique Energie

(co-habilité avec l'Université de Nancy I et l'INPL), dirigé par Jean-Claude Gatina (Pr. 60<sup>ème</sup> section)

Le prochain contrat quadriennal (2002-2006) prévoit l'ouverture d'un IUP Génie Civil (rentrée 2003), et d'un DESS, notre objectif à terme étant d'avoir une filière complète liée au Génie Civil et à l'environnement (formation doctorale et IUP). L'objectif de l'IUP/DESS est de compléter les formations citées précédemment, et de proposer une formation générale et scientifique de haut niveau. A Bac + 4, le diplôme d'ingénieur maître sera délivré sous réserve de passer avec succès les épreuves proposées dans ce cadre. Le niveau Bac + 5 sera sanctionné par un diplôme de DESS, mais pourrait évoluer vers un diplôme d'ingénieur à condition qu'un environnement adéquat soit mis en place à l'Université de La Réunion.

|   | Année de création | Niveau de qualification | Localisation                                      |
|---|-------------------|-------------------------|---|
| <b>Formations existantes</b>  |                   |                         |   |
| D.U.T. Génie Civil option Bâtiment  | 1998              | Bac+2                   | I.U.T. de Saint-Pierre                            |
| Licence Professionnelle « Gestion et Conduite de Projets »  | 2001              | Bac+3                   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Option Bâtiment et travaux publics ;</li> <li>▪ Option Habitat, énergie et environnement.</li> </ul> |                   |                         |   |
| D.E.A. Mécanique Energie  | 1996              | Bac + 5                 | Faculté des Sciences et Technologies, Saint-Denis |
| <b>Projets de formation</b>   |                   |                         |   |
| I.U.P. de Génie Civil   | 2003              | Bac + 5                 | Saint-Pierre                                      |
| D.E.S.S. Habitat et Environnement   |                   |                         |   |

Tableau 1 : La formation universitaire en Génie Civil à l'île de La Réunion (formations existantes et projets de création de filières).

Ainsi, la création d'un pôle de recherche lié au Génie Civil arrive à point nommé dans la continuité de l'essor des formations diplômantes liées à ce domaine.

Par ailleurs, les objectifs que nous nous sommes fixés sont de former nos étudiants aux métiers du Génie Civil en tenant compte de nos spécificités locales afin que ceux-ci soient performants à la fois au niveau régional mais également au niveau national et international (en particulier dans la zone Océan Indien).

### 1.3 La nécessité de continuer les activités de recherche liées à la validation

A titre plus personnel, je me suis impliqué depuis la fin de ma thèse dans les projets de création et de suivi de filières liées au Génie Civil. Comme cela a été exposé brièvement dans la première partie, j'ai eu l'opportunité d'être chargé de la mise en place du département Génie Civil de l'IUT en tant qu'ATER (1997-98) et d'assurer la direction du département Génie Civil jusqu'en septembre 2000. Je me suis également chargé de la demande

d'habilitation de la licence professionnelle « Gestion et Conduite de Projets », et je travaille actuellement avec Jean Claude Gatina, Pr. 60 sur le projet d'IUP Génie Civil. Les détails sur les activités administratives et pédagogiques que j'ai exercées ou que j'exerce actuellement se situent en annexe de ce mémoire.

Les responsabilités exercées pour la création et la direction du département ont été une réelle chance car cela m'a permis de concilier à la fois des impératifs pédagogiques (mise en place d'une filière nouvelle dans des locaux neufs) mais également des impératifs recherche (poursuite de mes thèmes de recherche liés à la validation de modèle d'enveloppe et de systèmes développés en thèse).

En effet, le site de l'IUT présentant un réel potentiel pour la thématique de validation que nous souhaitons développer, nous avons convaincu le directeur de l'IUT de l'intérêt de développer une activité de recherche en thermique du bâtiment qui viendrait renforcer celles de Saint-Denis.



## 2 Rappel sur la validation et les supports associés

### 2.1 Rappel bibliographique sur les supports expérimentaux en environnement naturel et contrôlé

Comme le soulignait Brau [Brau 80], toute approche théorique d'un système thermique demande une vérification expérimentale pour valider les résultats obtenus. C'est le cas pour la thermique de l'habitat, tant en ce qui concerne l'enveloppe que les équipements et systèmes thermiques qui vont y être intégrés.

Les supports expérimentaux peuvent avoir plusieurs formes différentes. En effet, les expérimentations peuvent être menées d'une part in-situ en environnement naturel, et d'autre part en laboratoire où dans ce cas, les sollicitations climatiques sont simulées. Dans le dernier cas, celles-ci peuvent donc être décomposées et décorréliées. De plus, l'expérimentateur peut faire des études en régime permanent ou variable [Brau 80] comme c'est le cas avec la cellule Optibat de l'INSA de Lyon [Allard 87].

La validation de logiciels à l'aide de cellules tests en environnement naturel est une tendance commune à toutes les équipes de recherche. L'idée générale est de constituer des bases de données à la fois climatiques et expérimentales afin de tester un logiciel sur des scénarii différents. Il existe par ailleurs une dynamique très forte de validation expérimentale entre les équipes de recherche, en Europe et aux Etats Unis, que ce soit pour des codes de référence tels que ESP-r<sup>1</sup> [ESRU 96], SERI-RES<sup>2</sup> [Martin 93], ou des codes plus récents tels que CLIM2000<sup>3</sup> [Rongère 90] ou APACHE<sup>4</sup> [Delille 96], [Bloomfield 95]. Cette démarche a été initiée dans le cadre de la sous tâche C « Model Evaluation » de l'annexe 21 de l'IEA (International Energy Agency) qui porte sur la validation expérimentale des différents codes de calcul dans le domaine de l'énergétique du bâtiment [Dalicieux 94]. A cet effet, un exercice réunissant plus d'une vingtaine d'utilisateurs de différents pays (onze au total), a été mis en place afin de tester leurs modèles sur le comportement d'une cellule en climat naturel.

Parmi les supports expérimentaux existant actuellement, nous pouvons citer les cellules de l'EMC (Energy Monitoring Company) [Martin 93], [Irving 93], [Lomas 94a], [Lomas 94b]. Les travaux de validation et de comparaison inter-logiciel précédemment cités sont réalisés avec ces cellules comme support expérimental. Il s'agit de huit cellules, montées par paire, en structure légère, qui possèdent sur leur face Sud un panneau amovible qui peut être remplacé suivant le cas par une paroi opaque, un vitrage simple ou double. Le site expérimental est localisé dans la banlieue Nord de Londres.

---

<sup>1</sup> Logiciel de référence européen, développé par ESRU, Université de Strathclyde, Ecosse (U.K.)

<sup>2</sup> Logiciel développé par ECOTOPE, NREL (ex SERI) aux Etats Unis, puis revu en Grande Bretagne.

<sup>3</sup> Logiciel développé par EDF, Direction des Etudes et Recherche, Renardières (France)

<sup>4</sup> Logiciel développé au FACET LTD (U.K.)

Par ailleurs, la Direction des Etudes et Recherches d'EDF dispose depuis 1990 d'un laboratoire d'essais thermiques et aérauliques [Girault 95]. Ce laboratoire est composé 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 Thermique 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.

Toujours en France, l'immeuble expérimental de Gaz de France a été utilisé dans le cadre de la validation expérimentale d'ALLAN [Boulkroune 92] en instrumentant un appartement F2 en grandeur réelle.

Nous pouvons également citer les cellules du programme PASSYS [PASSYS 94]. Les objectifs de ce programme sont principalement de tester des composants architecturaux en environnement naturel et sous différents climats. Les cellules sont adiabatiques, sauf sur la face Sud sur laquelle est monté le composant à tester. Ces cellules à échelle grandeur nature sont réparties sur douze sites en Europe afin de disposer de bases de données climatiques différentes et de tester le même composant architectural sous différents climats. PASSYS se veut donc être un programme destiné essentiellement au monde industriel, dans le but d'optimiser les performances des composants solaires passifs, mais sert également de base pour la validation du logiciel ESP-r développé par l'équipe de Clarke à Glasgow. Les équipes de recherche associées à PASSYS ont par la suite mis en place une méthodologie de validation dont nous parlerons dans le second chapitre.

Aux Etats Unis, des cellules tests ont servi de support expérimentaux dans le cadre de la validation de code de simulation thermique de bâtiments au NIST\* [Mahajan 84a] [Eppel 95]. D'autres supports utilisés pour la validation de DOE-2 consistent en huit maisons individuelles d'inerties différentes localisées sur le site de Pala (proche de San Diego) [Meldem 98].

Toutes ces expérimentations, dont la liste est loin d'être exhaustive, montrent bien la préoccupation des chercheurs qui est de vérifier les modèles de calculs proposés en utilisant des supports expérimentaux en climat naturel.

---

\* *National Institute of Standards and Technology*

## 2.2 Les supports expérimentaux utilisés pour notre code de simulation (période 1995-1997)

En ce qui concerne les climats tropicaux, l'existant en la matière possède l'inconvénient majeur d'avoir été réalisé pour des climats très différents de ceux de la Réunion. C'est pour cela que, au regard de ce qui se fait à l'échelle internationale, nos choix se sont portés entre autre sur une validation expérimentale in-situ de notre logiciel CODYRUN avec nos propres supports expérimentaux

Cette démarche a été initiée lors de ma thèse [Garde 97] et des DEA de Thierry Mara [Mara 96] et Franck Lucas [Lucas 96] dont les sujets directement liés à mes travaux de recherche, traitaient respectivement de la validation de modèles d'enveloppe et de la validation du couplage système/enveloppe.

### 2.2.1 La cellule LGI

Une cellule expérimentale baptisée cellule LGI et financée par l'ADEME a constitué le premier support expérimental utilisé par l'équipe [Boyer 96a]. Celle-ci a dans un premier temps été installée sur le toit de l'ancienne Faculté des Sciences et Technologies, telle que le montre la photographie ci-dessous. Un split-système avait également été instrumenté pour permettre l'étude des phénomènes transitoires dus à la régulation de l'appareil dans une ambiance donnée.

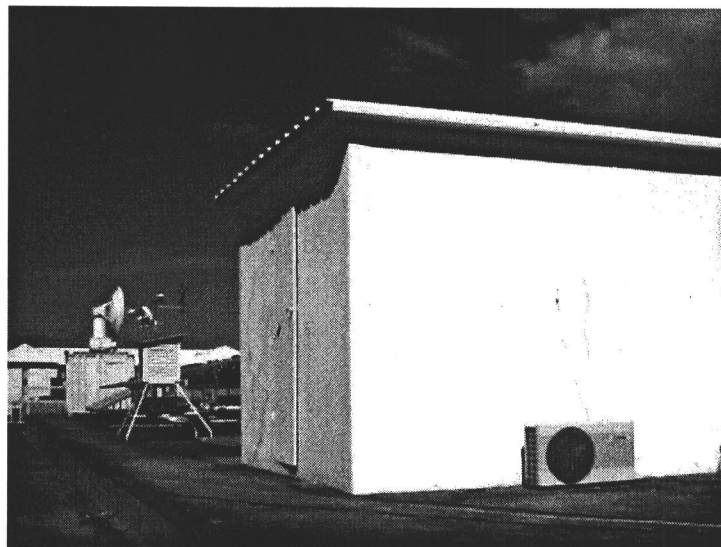


Figure 1 : La cellule LGI sur le toit de l'ancienne Faculté des Sciences (1995-1997).

La cellule a une surface intérieure au sol de  $9 \text{ m}^2$ , une hauteur de  $2.20 \text{ m}$  et occupe un volume intérieur de  $20 \text{ m}^3$ . Ses dimensions sont proches d'une pièce classique de type chambre à coucher ou bureau. Elle est constituée fonctionnellement par une ossature métallique auto-portante, un ensemble de parois fermées démontables, un vitrage ordinaire de  $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$

(orienté Sud), une porte PIC83 classique (orientée Nord) et un système de traitement d'air type split-système, avec une unité intérieure murale et une unité extérieure.

Les parois verticales sont constituées d'une épaisseur de 4 cm de mousse de polyuréthane prise en sandwich entre deux couches de 5 mm de fibrociment. Afin de limiter les ponts thermiques, le plancher, composé de dalle en béton, est découplé thermiquement du sol grâce à 5 cm de polystyrène.

Cette cellule dispose d'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, ...).

Les objectifs de la cellule sont doubles :

1. Réaliser des tests de composants actifs (systèmes de traitement d'air) et passifs du bâtiment afin de mesurer leur performance thermique in-situ. En ce qui concerne les systèmes, il est possible d'apprécier les performances énergétiques de l'appareil et les couplages enveloppe/système ;
2. Contribuer à la validation expérimentale de modèles en thermique du bâtiment et de codes de calculs en thermique du bâtiment. Des bases de données peuvent alors être constituées et utilisées par l'ensemble des acteurs de la validation.

Les premiers résultats expérimentaux effectués sur la cellule LGI ont permis de mettre en place une méthodologie de validation sur notre code de simulation [Mara 96], [Garde 97]. Les premières campagnes de mesure ont servi également à la validation du modèle d'enveloppe de la cellule LGI [Mara 98] et du modèle de couplage cellule LGI/split-système [Lucas 97], [Lucas 96], [Garde 01b].

### 2.2.2 La maison de l'Hermitage

Un autre type de support a également été utilisé : celui de la maison de l'Hermitage. Ce support (du nom du village où est localisée 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 ont permis une première confrontation mesures/modèle pour CODYRUN et TRNSYS et ont été publiés respectivement sous forme de communications dans [Garde 95] et de publication dans [Lucas 98].

Les premières conclusions associées à ce travail ont démontré :

- o 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 [Calogine 97], [Adelard 98b].

- l'intérêt 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 [Garde 95], [Garde 97]. Les supports ISOTEST (voir sections suivantes) et le travail de thèse de Frédéric Miranville s'inscrivent dans cette perspective.

### 2.2.3 Vers une évolution des supports expérimentaux

Les sites pré cités allaient rapidement nous poser plusieurs problèmes de gestion quotidienne :

- l'espace autour de la cellule était restreint et ne facilitait pas les interventions de maintenance ;
- les futures constructions de bâtiment de l'Université autour du site de la cellule allaient poser un problème de masque proches (ombre portée des bâtiments sur notre cellule) et de perturbation de l'écoulement du vent ;
- la cellule posait un problème de manutention et de sécurité en cas d'alerte cyclonique : nous devions en effet démonter la cellule en cas de vigilance cyclonique. Cette contrainte s'est révélée particulièrement pénible lorsque nous avons dû interrompre nos mesures pour démonter la cellule plusieurs fois en l'espace de quelques semaines !
- l'évolution de ce type de plate-forme était limitée et ne permettait pas une extension à d'autre type de supports expérimentaux ;
- le site de l'Hermitage bien que représentatif de l'habitat réunionnais ne nous appartenait pas : les problèmes de localisation (éloignement de l'Université), de gestion de la sécurité du matériel, de coût de location de l'habitat et du manque de connaissance précise des propriétés thermo-physiques des matériaux, nous ont orienté vers d'autres solutions

## 3 Nécessité de développer de nouveaux supports expérimentaux

La stratégie et les perspectives de l'équipe en matière de validation de modèles a fait naître la nécessité de trouver un nouvel emplacement pour l'implantation de nouveaux supports. En effet, les travaux de recherche menés par Thierry Mara, Franck Lucas et moi même ont conduit à des besoins nouveaux que seule une plate-forme expérimentale à la fois en environnement naturel et contrôlé pouvait résoudre.

Par ailleurs, les nouvelles perspectives portant sur la modélisation et la validation des composants spécifiques utilisés dans le domaine de la protection solaire démontraient la nécessité de développer des cellules d'essais à échelle réduite en complément de la cellule LGI.

### 3.1 La problématique des Produits Minces Réfléchissants (PMR)

Les travaux de recherche relatifs aux PMR s'inscrivent dans le cadre des techniques de climatisation passives des bâtiments. Le climat de l'île de La Réunion, climat de type tropical humide, impose des sollicitations extrêmes aux bâtiments (rayonnement solaire intense et faible ventilation en période estivale) et incite de ce fait à l'utilisation généralisée des systèmes de climatisation active, forts consommateurs d'énergie, à des fins de confort thermique. Ce constat associé aux limitations économiques (principe de péréquation tarifaire) et de production (insularité) d'Electricité De France, ont conduit à une opération expérimentale visant à améliorer le confort thermique dans les bâtiments en utilisant des techniques passives simples; il s'agit de l'opération expérimentale ECODOM, lancée dans l'ensemble des Départements d'Outremer. Celle-ci est synthétisée par un document de référence [Célaire 97], dans lequel sont indiquées des prescriptions techniques permettant d'aboutir à l'habitat bioclimatique en améliorant d'une part la ventilation naturelle et d'autre part la protection solaire des logements.

La protection solaire, dans le cas de parois opaques (murs, toiture, etc.) est réalisée par l'insertion d'un isolant thermique dans l'enveloppe du bâtiment. Or l'offre du marché des produits d'isolation thermique est large [INSET 97] et propose entre autres les Produits Minces Réfléchissants (PMR), qui se présentent sous la forme de membranes minces (épaisseur de l'ordre de quelques millimètres), dont les faces sont recouvertes d'une fine pellicule réfléchissante, généralement un dépôt d'aluminium. Ils forment ainsi une barrière au rayonnement thermique en réfléchissant une grande partie (de l'ordre de 95%) du rayonnement incident. De plus, leur principe d'action nécessite la présence de lames d'air au contact de la (ou des) face(s) réfléchissante(s), pour des performances optimales.

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 de leur utilisation notamment 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 préfigurant l'opération expérimentale ECODOM, il nous est apparu nécessaire de mettre en œuvre les moyens d'une caractérisation expérimentale fiable.

Afin de permettre une détermination fiable des performances de ce type de procédé d'isolation thermique, nous avons développé une méthodologie qui comprend deux volets, l'un expérimental, dont le but est de déterminer de manière précise le comportement thermique des PMR en condition de service, l'autre théorique, ayant pour objet la modélisation fine des PMR afin de mieux cerner les mécanismes sous-jacents aux phénomènes physiques mis en jeu. Ce travail est actuellement mené dans le cadre de la thèse de Frédéric Miranville (voir Annexe B - Encadrement doctoral)

## 3.2 Amélioration de la validation des modèles thermo-hydriques en climatisation passive et active

### 3.2.1 La validation du modèle d'enveloppe de la cellule LGI

Les travaux de recherche menés par Thierry Mara au cours de sa thèse ont montré l'intérêt de disposer d'une instrumentation plus complète de la cellule, notamment en ce qui concerne les conditions aux limites de type flux nul. Par ailleurs, il est toujours intéressant dans une démarche de validation, lorsqu'un modèle d'enveloppe est valide pour une configuration donnée (séquences météorologiques et site particulier), de reconduire une nouvelle séquence de mesure sur une autre période (et idéalement sur un autre site) et de vérifier que le nouveau résidu modèle/mesure donne des résultats intéressants. Il s'agit de la démarche dite de *corroboration* introduite par Kleijnen [Kleijnen 95] et reproduite par Mara [Mara 00].

L'opportunité de disposer d'un nouveau site permet de vérifier cette étape de *corroboration* pour le modèle d'enveloppe de la cellule LGI décrit sous CODYRUN.

### 3.2.2 Amélioration de la prise en compte des transferts hydriques

Les premiers résultats de validation sur la période 1995-1997 ont porté essentiellement sur la comparaison de la température résultante et de la température sèche d'air entre la mesure et le modèle. Peu d'expérimentateurs osent s'aventurer sur le terrain de la validation des modèles d'humidité. C'est pourquoi nous avons défini un travail de recherche sur ce problème (voir encadrement doctoral de Franck Lucas en Annexe E). Une meilleure approche des couplages thermo-hydriques, notamment avec la prise en compte des transferts de masse dans les parois et le stockage de l'eau dans les parois, permettent d'améliorer sensiblement la prédiction de l'humidité spécifique à l'intérieur du bâtiment, et par conséquent les risques de dégradation dus à la condensation [Lucas 00].

Ici aussi, la nécessité d'avoir des supports expérimentaux pour tester la validité des modèles hydriques est primordiale.

### 3.2.3 Amélioration du couplage enveloppe/système

Les travaux réalisés lors de ma thèse [Garde 97], présentés également dans [Garde 01b] sur la modélisation des systèmes de traitement d'air et la couplage système/enveloppe faisaient apparaître un certain nombre points à améliorer :

Concernant la modélisation des systèmes en régime permanent, l'ensemble des modèles développés utilise des données « constructeur » établies pour des conditions spécifiques [Carrier 96] selon le protocole défini par l'ASHRAE [ASHRAE 83] surtout pour une température sèche d'air intérieure de 27°C. Les performances du système (puissances frigorifiques totale, sensible, puissance absorbée, efficacité frigorifique) sont indiquées par le constructeur pour certaines conditions fixées de température extérieure et de température de bulbe humide. L'extrapolation du modèle à une température d'air intérieure quelconque utilise la méthode du facteur de By-pass présentée dans le chapitre 2.4 de ce mémoire et

également dans [Garde 97] et [Garde 01b]. Cette méthode a également été utilisée par Henderson [Henderson 92] et Hirsch [Hirsch 82]. Les premiers résultats de validation ont fait apparaître un problème de modélisation sur l'humidité spécifique du à une mauvaise estimation des puissances latentes du système et aux hypothèses simplificatrices évoquées dans la section précédente (transferts de masse et stockage eau/paroi négligés).

Une cellule d'essai en environnement contrôlé permet de :

- vérifier les valeurs de performance affichées par le constructeur en régime permanent, d'étendre les conditions de mesures pour des températures d'air différentes de 27°C ;
- mesurer les paramètres caractéristiques du système en régime dynamique (constante de temps, zone morte du régulateur) dont les valeurs sont nécessaires pour la modélisation du régime dynamique (voir chapitre 2.4 du mémoire d'HDR) ;
- comprendre les phénomènes liés à la déshumidification/réhumidification au niveau des batteries d'échange.

Une cellule en environnement naturel permet de

- mieux cerner l'étude enveloppe/système et de valider le modèle de système couplé au bâtiment ;
- valider le modèle hydrique en climatisation active et en fonctionnement normal (régulation en marche).



### 3.2.4 Synthèse

Nous voyons donc au travers des travaux de l'équipe que le fait d'un disposer d'un nouveau site expérimental permet d'étendre ce que Dalicieux appelait la définition du domaine de validation [Dalicieux 93] avec de nouvelles séquences de mesure, de nouvelles configurations géométriques de cellule et des scénarios de validation étendus et adaptés à l'évolution des modèles que nous développons.

Le tableau ci-dessous résume les nouveaux domaines de validation qui s'ouvrent à nous grâce à ce nouvel outil :

| Domaine de validation   | Objectifs  | Personnes associées                                     |
|---|--|---|
| <b>Environnement naturel</b>  |  |   |
| Modèle global d'enveloppe (thermique)                                   | Etude des transferts thermiques, corroboration. Prise en compte du rayonnement direct (le seul vitrage de la cellule était jusqu'alors orienté au sud pour ne prendre en compte que le rayonnement Diffus).                      | Thierry Mara,<br>François Garde,<br>Frédéric Miranville |
| Modèle global d'enveloppe<br>Transferts couplés<br>(thermique/hydrique) | Avec débit d'air contrôlé dans un premier temps. Validation des modèles hygro-thermique.   | Franck Lucas,<br>François Garde                         |
| Modèle élémentaire<br>(système thermique<br>découplé)                   | Etude des composants spécifiques et/ou de parois complexes utilisés dans le domaine de la protection solaire (PMR).  | Frédéric Miranville<br>Eric Fock<br>François Garde      |
| Confort thermique   | ce point est traité dans la partie « Perspectives » de ce mémoire).  | Laetitia Adelard,<br>François Garde                     |
| Couplage<br>enveloppe/système   | Etude de la dégradation des performances due au régime dynamique. Validation des modèles couplés.  | Franck Lucas,<br>François Garde                         |
| <b>En environnement contrôlé</b>  |  |   |
| Système de climatisation  | Etude et validation du comportement en régime permanent et dynamique de systèmes de traitement d'air.<br>Mesure des paramètres influents.<br>Influence des phénomènes de condensation au niveau de la batterie de l'évaporateur. | Franck Lucas<br>Eric Fock<br>François Garde             |
| Système de VMC  | Validation de modèles de composants aérauliques type VMC (auto et hygro réglables).  | Franck Lucas  |
| Transferts d'humidité   | Caractérisation des performances hydriques des matériaux.<br>Validation des modèles de transferts d'humidité dans les parois.  | Franck Lucas  |

Tableau 2 : Synthèse des domaines de validation couverts par la plate-forme expérimentale et personnes associées au travail de validation.

Pour cela, il est donc nécessaire de disposer d'un site important comprenant à la fois :

- une plate-forme d'essai en environnement naturel ;
- une ou plusieurs cellules d'essai en environnement contrôlé ;
- un espace de préparation de manipulations (salle de mesure) ;
- une station météo sur site.

### 3.3 Les avantages du site de Terre Sainte

La bibliographie précitée ainsi que les visites d'installations expérimentales qui ont pu être effectuées en métropole sur les cellules PASSYS du CEA de Cadarache ou à EDF ont montré la nécessité de disposer d'un site particulièrement dégagé lorsque l'on souhaite implanter une cellule expérimentale. L'absence de masques proches et/ou lointains, la certitude d'avoir un vent non perturbé sont des éléments clés dans le choix géographique de l'implantation du support expérimental.

Le site de Terre Sainte présente de telles qualités. Situé en environnement semi-urbain, le site est idéal pour implanter un environnement expérimental répondant parfaitement à nos objectifs. Saint-Pierre possède en outre les statistiques d'ensoleillement les plus importantes de l'île. Les sollicitations climatiques y sont donc particulièrement extrêmes. Par ailleurs, le département Génie Civil dispose d'une halle d'essais de 1000 m<sup>2</sup> destinées aux essais de structure et de stabilité des constructions. Un tel volume peut accueillir des expérimentations en environnement contrôlé.

Enfin, le fait d'être en charge du suivi de chantier du bâtiment lors de sa construction et de prendre la direction du Département Génie Civil a sans aucun doute favorisé l'émergence d'un environnement de recherche à l'IUT. Il est en effet beaucoup plus facile d'insérer un environnement de recherche dans un projet en construction que lorsque les habitudes, les locaux et les personnes sont déjà en place.

Les directeurs successifs de l'IUT ont heureusement compris les enjeux et l'intérêt pour notre laboratoire, l'IUT et même l'île de La Réunion. C'est ce que nous allons voir dans les sections suivantes.

## 4 La plate-forme expérimentale de l'IUT

### 4.1 Introduction

La plate-forme expérimentale mise en place à l'I.U.T de Saint-Pierre (La Réunion) a pour objectif de répondre aux préoccupations sus mentionnées, en offrant un environnement expérimental complet aussi bien en environnement naturel qu'en environnement contrôlé. Sa mise en place a nécessité un investissement en temps, en moyen humains et matériels d'un certain nombre de personnes externes et internes au laboratoire. Cette section se propose de faire une présentation globale, de la gestation à la réalisation de la plate-forme.

La plate-forme expérimentale en environnement naturel a fait l'objet du stage de DEA de Frédéric Miranville entre mars 1999 et septembre 2000 [Miranville 99]. Celui-ci avait pour objectif de rendre opérationnelle toute la partie dédiée à l'expérimentation en environnement naturel.

### 4.2 Plate-forme expérimentale en environnement naturel

#### 4.2.1 Cahier des charges et méthodologie

Avant la réalisation proprement dite de la plate-forme expérimentale, une phase de conception était nécessaire en vue de respecter un cahier des charges comportant les points suivants :

1. En premier lieu, la plate-forme a été implantée de telle sorte que l'influence des éléments environnants existants soit limitée, et également que les éléments internes n'interagissent pas les uns avec les autres.
2. Ensuite, elle inclut les moyens d'une caractérisation des performances thermiques de composants de toiture d'une part, et d'enveloppe globale d'autre part. Les supports physiques des éléments à tester sont de deux natures : d'une part des cellules à échelle réduite, au nombre de cinq (pour les composants de toiture) et d'autre part la cellule LGI à échelle 1 (pour les performances globales) qui a été déplacée du site de Saint-Denis.
3. En outre, la plate-forme dispose des moyens fonctionnels nécessaires à des campagnes de mesure à court et long terme, incluant une station météorologique, nécessaire à la détermination des données climatiques du site.
4. En dernier lieu, les coûts d'une telle opération ont été optimisés.

Compte tenu des surfaces disponibles à l'IUT de Saint-Pierre, seule une zone d'environ 250 m<sup>2</sup> a pu réunir les conditions idéales. De plus, en vue de soumettre les cellules expérimentales aux mêmes sollicitations, et de limiter leur influence mutuelle, une méthodologie a été mise en place, tenant compte en priorité des conditions d'ensoleillement et de vent. Ces deux derniers paramètres déterminent la disposition des éléments sur la plate-forme, étant entendu que la prise en compte des autres données climatiques, la température d'air, l'hygrométrie extérieure et la direction du vent n'a que peu d'incidence sur celle-ci.

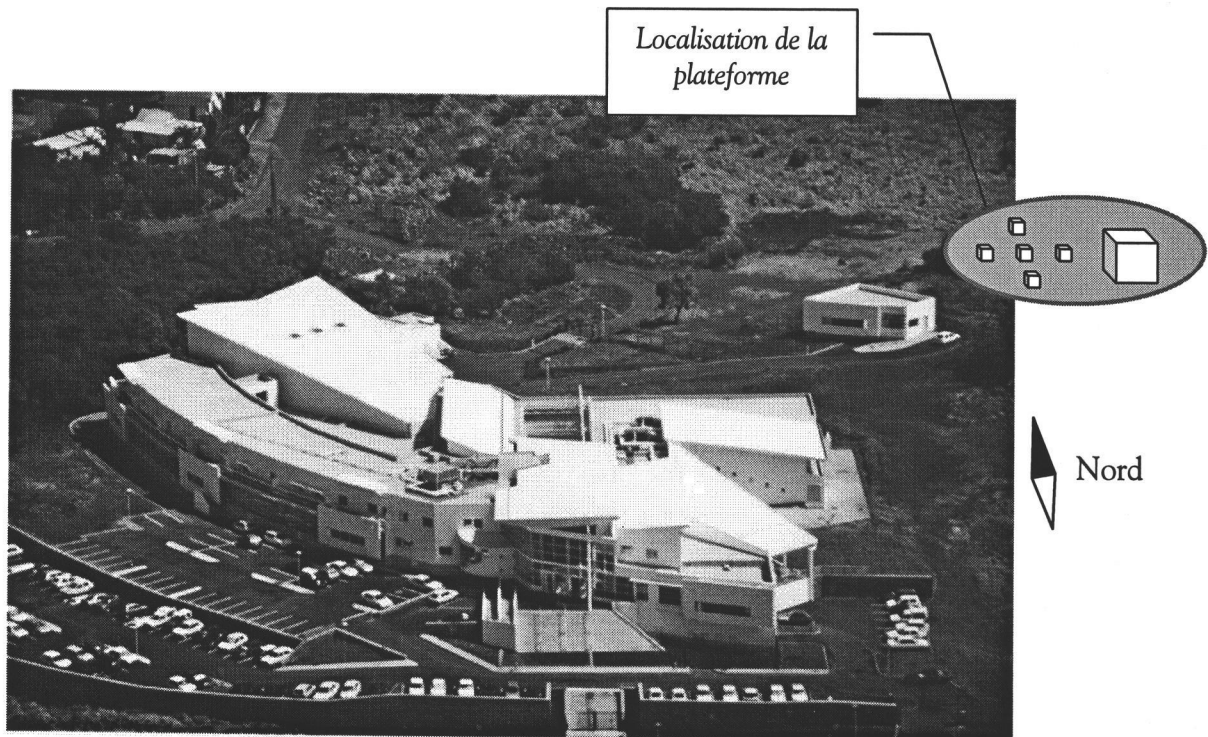


Figure 2 : Localisation de la plateforme en environnement naturel : notre choix s'est porté sur un emplacement à l'arrière de l'IUT, avec une orientation principale au nord favorisant un ensoleillement optimal (pas de masques proches ni lointains).

#### 4.2.2 Méthodologie de disposition des éléments de la plate-forme

Pour pouvoir disposer les cellules dans les mêmes conditions d'ensoleillement, nous nous sommes intéressés à la disposition des éléments de la plateforme par rapport à la course du soleil. Dans notre cas, nous nous sommes fixés pour objectif de limiter autant que possible les ombres portées d'une cellule sur l'autre tout au long de l'année, connaissant approximativement leur dimension, soit  $1\text{m}^3$  ( $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$ ) pour les cellules à échelle réduite et  $20\text{m}^3$  ( $3\text{m}\times 3\text{m}\times 2,2\text{m}$ ) pour la cellule LGI à échelle 1, et en tenant compte d'une marge de sécurité.

Dans notre cas, compte tenu du facteur important que représente l'ensoleillement, la période quotidienne au cours de laquelle il ne doit pas y avoir d'ombre portée se devait d'être la plus étendue possible tout en étant réaliste ; la période choisie, en se basant sur le diagramme solaire de l'île de La Réunion [Gatina 82] s'étend de 8h à 16h.

Il est alors relativement aisé, en fonction des critères retenus, de trouver une disposition adéquate. Il est cependant à noter, compte tenu de ce qui précède, que la meilleure disposition est celle où les cellules sont alignées dans l'axe nord/sud géographique et suffisamment distantes.

Dans le cadre de ce projet, il fallait prendre en compte la surface qui nous était allouée et optimiser son utilisation. En se plaçant dans le cas le plus défavorable, soit en hiver à 8h, nous avons opté pour la disposition représentée par les Figure 3 et Figure 4.

Pour les besoins fonctionnels de la plate-forme, il est à noter qu'un local technique a été aménagé, permettant ainsi de centraliser les dispositifs d'alimentation du matériel et d'acquisition des mesures.

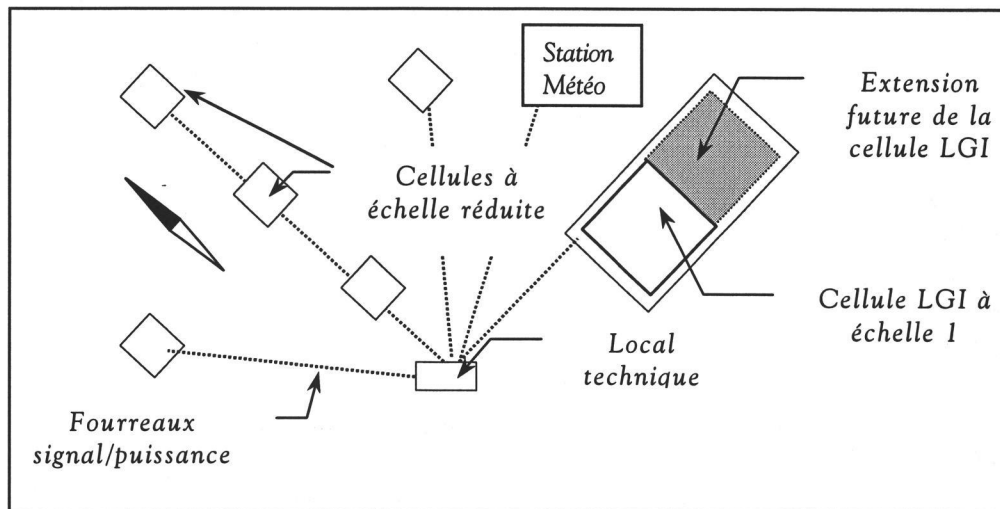


Figure 3: Disposition des cellules expérimentales (vue en plan)

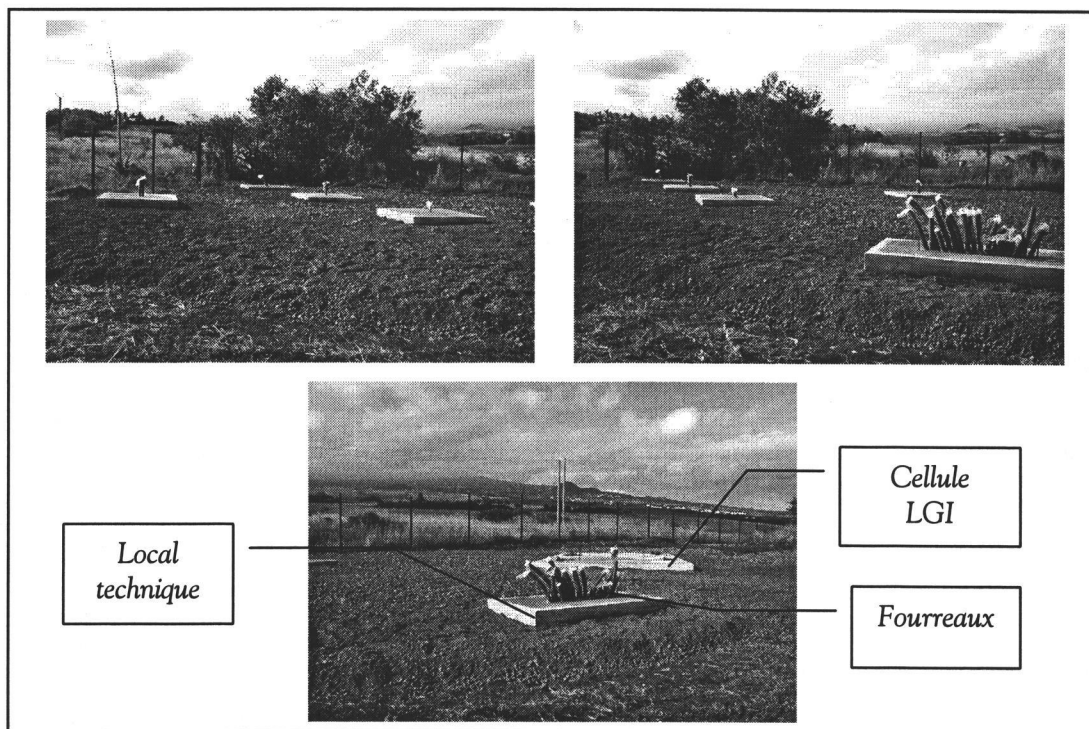


Figure 4 : Les dalles de soutien de la plate-forme expérimentale. Des fourreaux relient les plots des cellules à échelle réduite et la cellule LGI à un local technique pour centraliser la partie puissance et la partie signal.

### 4.2.3 Les cellules expérimentales ISOTEST

Les cellules expérimentales *ISOTEST* constituent des bancs d'essais pour tester les complexes de toiture incluant des isolants thermiques ou des procédés d'isolation thermique. De faibles dimensions (volume intérieur approximatif d'environ 1 m<sup>3</sup>), elles sont conçues de manière à placer le complexe de toiture à caractériser dans les conditions les plus défavorables pour une évaluation en conditions extrêmes de ses performances. Elles permettent ainsi de quantifier, grâce à une instrumentation détaillée, le gain énergétique lié à des composants du bâtiment utilisés en climatisation passive. Elles constituent en outre un support de validation expérimentale des modèles de composants testés.

A l'heure actuelle, deux cellules *ISOTEST* sont actuellement instrumentées. Celles-ci diffèrent seulement au niveau de la conception du complexe de toiture (avec ou sans PMR).



Figure 5: la cellule expérimentale Isotest sur sa dalle en béton

#### **Conception :**

Les cellules satisfont aux exigences suivantes :

- permettre de caractériser le comportement des PMR ou de tout autre isolant utilisé dans le domaine de la protection solaire ;
- limiter les apports par les parois verticales et favoriser les apports par la toiture ;
- présenter un aspect évolutif ;
- permettre la modification de paramètres clés dans la performance du PMR ;
- permettre l'étude des performances en ventilation naturelle ;
- être simple de conception et de réalisation.

L'enceinte principale des cellules est constituée :

- d'un cadre principal réalisé en cornières soudées (acier galvanisé) ;
- de parois principales en contre-plaqué étanche d'épaisseur 1.5cm ;
- de parois amovibles en contre-plaqué étanche d'épaisseur 1.5cm, à positions variables (4 positions) pour faire des études en ventilation naturelle ;
- de plaques de polystyrène expansé pour l'isolation des parois latérales.

Les parois verticales sont peintes en blanc afin de limiter les apports solaires.

Les toitures diffèrent suivant le type de protection solaire. D'une manière générale, la couleur est noire ceci afin d'optimiser les apports solaires et d'avoir une absorptivité connue.

Pour le moment, les deux cellules instrumentées sont pourvues d'un complexe de toiture tel que représenté par la Figure 6. La seule différence est que l'une d'entre elles n'est pas pourvue de PMR, ceci afin de voir l'impact de ce procédé d'isolation en conditions réelles.

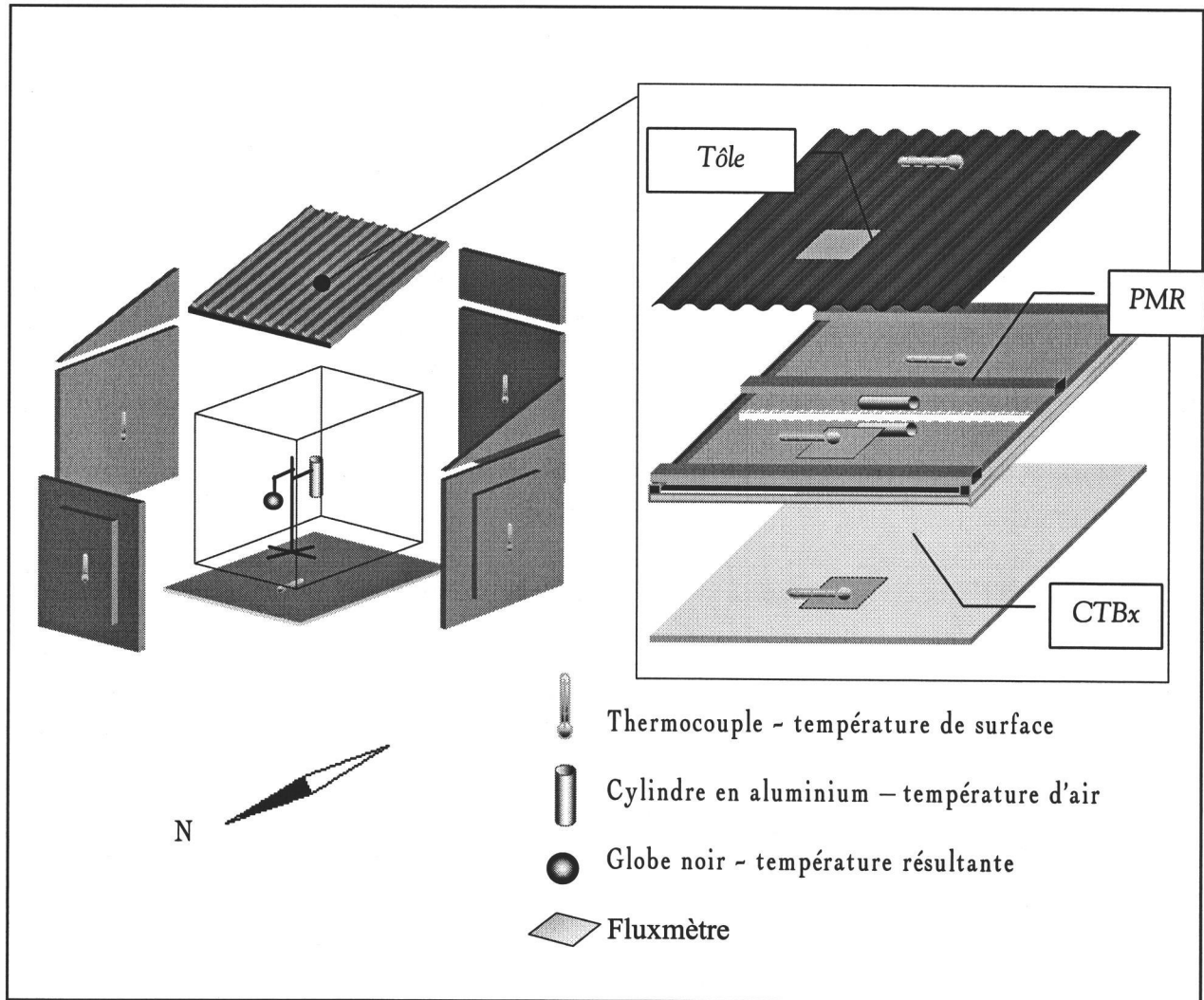


Figure 6 : Implantation des capteurs au sein des cellules Isotest. La toiture est constituée sur l'une des cellules par un complexe tôle/lame d'air/PMR/lame d'air/Contreplaqué (CTBx).

#### Instrumentation et capteurs associés :

Pour permettre la caractérisation in situ des performances thermiques du complexe de toiture, différents types de mesures ont été effectués: les flux traversant la toiture, le PMR et le faux plafond, les températures de surface des éléments précédents et les températures d'air à l'intérieur des lames d'air. De même, concernant l'enceinte isolée de la cellule, les températures de surface des parois latérales et du plancher ont été mesurées ainsi que la température d'air intérieur et la température résultante.

Les mesures de flux sont effectuées à l'aide de fluxmètres carrés disposant d'une surface active de  $100 \text{ cm}^2$  et dotés d'une précision de  $\pm 5\%$ .

Les températures d'air dans les deux lames d'air sont obtenues par des thermocouples, protégés du rayonnement ambiant à l'aide de cylindres d'aluminium. Les températures de surface de la tôle, du PMR et du faux plafond sont de même données par des thermocouples de type T. Concernant l'enceinte de la cellule, les températures de surface des quatre parois latérales et du plancher sont mesurées par des thermocouples de type T ; la température d'air à l'intérieur de l'enceinte est déterminée à l'aide d'un thermocouple protégé par un cylindre en aluminium, et un thermocouple inséré dans un globe noir donne la température résultante, température effectivement ressentie par le corps humain. Ces deux dernières températures constituent des indicateurs de confort thermique à l'intérieur de la cellule. Pour avoir accès au rayonnement solaire dans le plan de la toiture, un pyranomètre de précision  $\pm 5\%$  est fixé sur l'une des parois latérales.

Au titre des perspectives, l'instrumentation des deux cellules d'essais existantes, qui jusqu'à lors ne concernait que des mesures thermiques s'est enrichie d'anémomètres à fils chauds, permettant d'avoir une idée précise des vitesses d'air à l'intérieures des lames d'air ; étant donné que ces dernières peuvent ou non être ventilées, il nous sera alors possible de déterminer le lien entre les performances thermiques du complexe à base de PMR et les conditions de ventilations de la (ou des) lame(s) d'air, lors d'une étude à venir.

En outre, une collaboration avec un distributeur local de toitures isolées est en cours, en vue de comparer les performances thermiques des complexes de toiture à base de PMR à ceux de complexes à base de mousse polyuréthane. Pour l'heure les échantillons de toitures (5) ont été réalisés et leur mise en place sur des bâtis expérimentaux est prévue dans les semaines à venir (novembre 2001). Ces nouvelles cellules à échelles réduites nous permettront de statuer sur la valeur des PMR en isolation thermique par des mesures comparatives avec des isolants d'ores et déjà reconnus.

#### 4.2.4 Amélioration de la cellule LGI

La cellule LGI a été déplacée du site initial de Saint-Denis. La configuration de la cellule (orientation, matériaux etc.) est restée identique, ceci pour les besoins de corroboration détaillés précédemment dans les travaux de thèse de Thierry Mara [Mara 00]. La cellule possède toujours un système de traitement d'air (de type split-système) pour les études relatives au couplage enveloppe/système.

La cellule est entièrement instrumentée en capteur de températures d'air, température résultante, température de surface et humidité relative. Nous ne reprendrons pas ici la description complète de cette installation qui peut être trouvée dans les références bibliographiques suivantes : [Garde 97] [Mara 00].



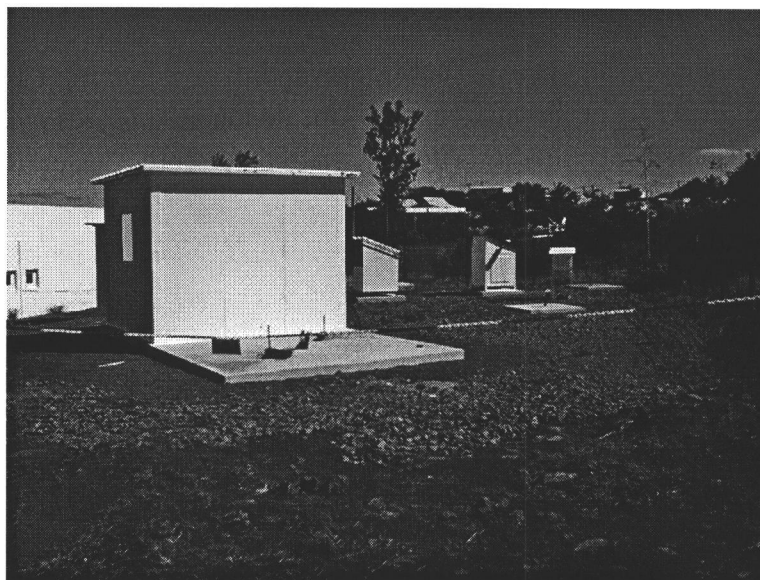


Figure 7: la cellule expérimentale LGI sur le nouveau site de Terre Sainte.

Des améliorations ont toutefois été apportées au niveau de l'instrumentation de la cellule à la fois pour répondre aux besoins liés à la validation de modèles et à l'analyse de sensibilité (meilleur positionnement de capteurs) et pour étudier les transferts d'humidité :

- ajouts de thermocouples dans la dalle en béton : Nous avons positionnés des thermocouples dans la dalle en béton servant de support à la cellule, à une distance de 5 cm, 10 cm et 20 cm. Ceci nous permettra de vérifier les conditions aux limites dans le sol et de comparer les mesures au modèle [Mara 00], [Lauret 01b] ;
- ajout d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée) pour un meilleur contrôle des débits d'air. La ventilation mécanique contrôlée installée est de type autoréglable avec un débit nominal de 30 m<sup>3</sup>/h. L'entrée et l'extraction autoréglables sont disposées en vis à vis sur les façades sud et nord. Le ventilateur d'extraction est positionné en paroi près de la porte et la bouche d'extraction est fixée sur la porte et connectée au ventilateur par un conduit flexible ;
- ajout d'un humidificateur : Notre objectif ici est de réaliser des injections brutales d'humidité sous forme d'échelons ou « steps ». Il est nécessaire d'utiliser un dispositif à faible inertie, contenant peu d'eau et montant rapidement en température. Il est donc constitué d'une éprouvette en verre de deux litres environ, isolée thermiquement et reposant sur une balance de précision. Une résistance électrique de 1 kW permet la vaporisation de l'eau entre 6 et 8 minutes après la mise sous tension ;
- Ajout d'un volume important de bois pour les mesures spécifiques au stockage d'humidité dans les matériaux. Pour les expérimentations avec « tampon » hygroscopique, la cellule a été remplie par un chargement de madriers en bois de longueurs variables entre 1,2m et 2,2 m et de section 80x200 mm. Le bois choisi est du Cryptoméria du Japon (aspect similaire au sapin), de volume approximatif égal à 0.59 m<sup>3</sup>.

La figure ci-dessous montre cellule LGI chargée en bois (représentant le mobilier), le dispositif de ventilation mécanique contrôlée et l'humidificateur placé au centre de la cellule.

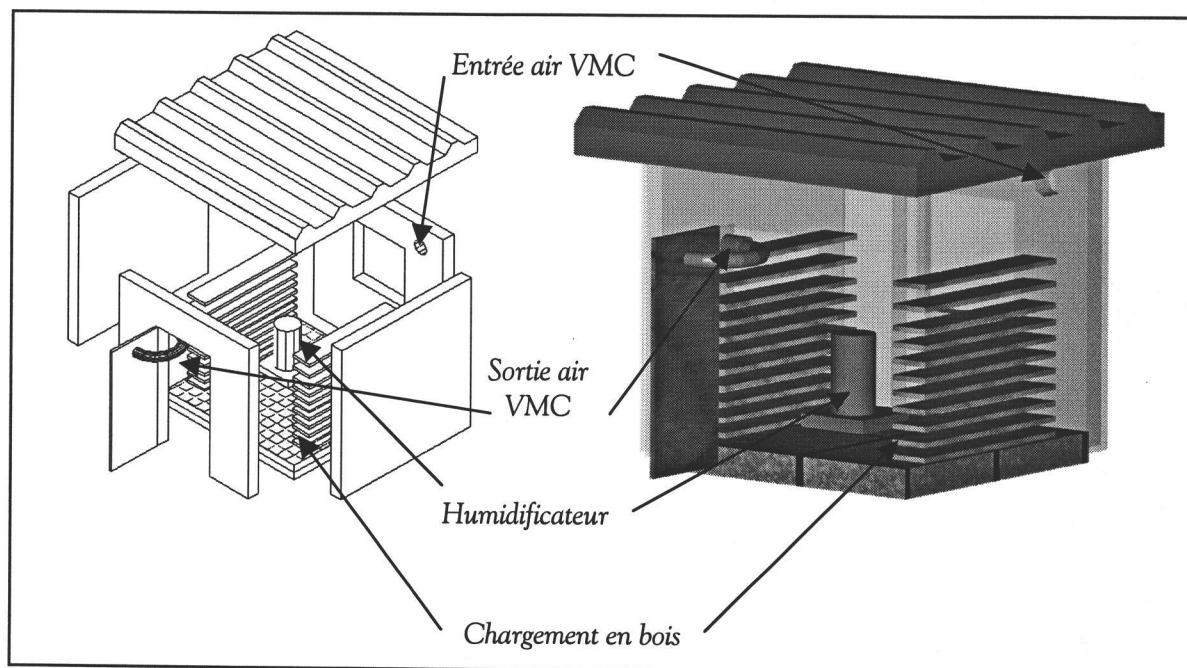


Figure 8 : Schéma de la cellule LGI avec VMC, humidificateur et chargement de bois.

#### Perspectives :

L'extension de cette plate-forme expérimentale avec une deuxième cellule accolée à la cellule LGI permettra de plus de valider les modèles de bâtiments multizones. Pour cela, l'emplacement de cette deuxième est prévu et pré-instrumenté (fourreaux déjà positionnés et thermocouples coulés dans la dalle). Les couplages thermo-aérauliques et radiatifs entre deux zones d'un bâtiment pourront ainsi être testés en site réel et à échelle 1.

Les financements associés à cette cellule sont demandés dans le cadre des crédits structurants 2001 (montant estimatif : 200 kF).

#### 4.2.5 Station météorologique

Une station météorologique est localisée à proximité des cellules. Celle ci enregistre régulièrement les données suivantes (à des pas de temps définis par l'utilisateur):

- ensoleillement direct et diffus ;
- température et humidité extérieure ;
- vitesse et direction du vent ;
- échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde (mesure de la température du ciel).

Par ailleurs, l'utilité de cette cellule est bien évidemment de disposer des données climatiques du site utilisé pour une procédure de validation expérimentale. Il s'agit d'ailleurs de l'un des critères définis par Lomas pour justifier d'une base de données de qualité (High

Quality Data Set) [Lomas 91] pouvant être ensuite échangée avec d'autres équipes de recherche.

Dans un second temps, les données peuvent être utilisées pour les travaux de Laetitia Adelard concernant la classification climatique approfondie des régions réunionnaises et la mise en oeuvre d'un générateur de données climatiques cohérentes [Adelard 98], [Adelard 00]. En disposant d'une deuxième base de données dans le sud, le générateur de climat mis en place à l'aide de données climatiques enregistrées sur Saint-Denis peut ainsi être validé et amélioré.

#### 4.2.6 Description de la chaîne d'acquisition générale de la plate-forme

Les éléments de la plate-forme décrits précédemment, sont pourvus d'appareils pour l'acquisition de mesures. La plate-forme expérimentale est à ce titre conçue pour faciliter le transfert des données de chaque cellule expérimentale, via un réseau de communication en fourreaux enterrés. Ce réseau comprend les câbles d'acheminement des signaux de mesures issus de chaque cellule expérimentale vers le local technique et les câbles d'alimentation électrique de tous les dispositifs concernés. Le local technique joue ainsi le rôle de poste de contrôle et centralise l'alimentation générale des systèmes et l'acquisition des données. Cette dernière opération est réalisée par un micro-ordinateur, dédié au pilotage des centrales d'acquisition de mesures. En outre la chaîne d'acquisition se compose pour les cellules ISOTEST, d'une centrale d'acquisition située dans le local technique et de multiplexeurs situés dans les cellules ; la centrale d'acquisition relative à la cellule LGI est quant à elle située dans la cellule même, et pilotée à distance par le micro-ordinateur de contrôle. Ces éléments sont synthétisés sur la figure suivante.

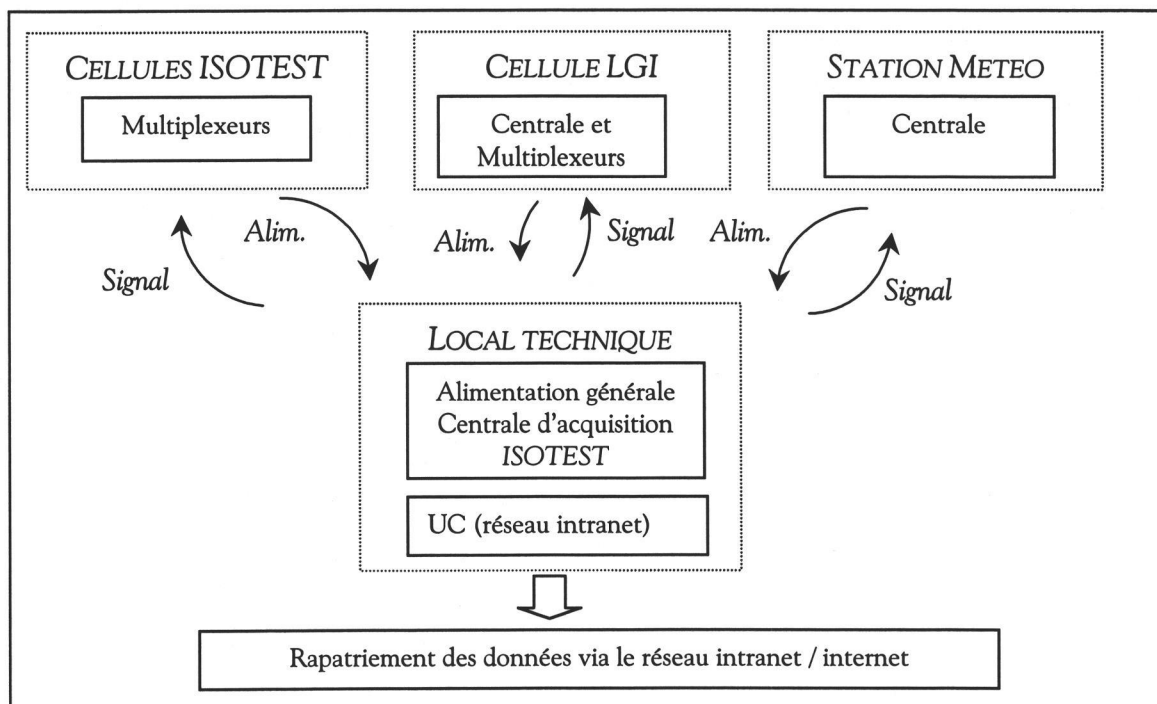


Figure 9: Synoptique des chaînes d'acquisition associées aux cellules expérimentales ISOTEST et LGI.

Les données météorologiques du site sont relevées grâce à une station de mesure des paramètres climatiques ; comme précédemment, l'ensemble de ces mesures fait l'objet d'une acquisition par une centrale d'acquisition de mesures, située dans un abri météorologique, et est transmis au local technique par le réseau de communication souterrain. Enfin, l'ensemble des manipulations peut être piloté depuis n'importe quel poste de l'IUT via le réseau intranet et internet. L'UC de contrôle dans le local technique est en effet doté d'une carte ethernet permettant la prise de contrôle, le lancement des manipulations et le rapatriement des données.

### **4.3 La cellule d'essai en environnement contrôlé : Le STA-tron (cellule d'essai pour climatiseurs individuels et étude des phénomènes de condensation dans l'habitat)**

Compte tenu des travaux expérimentaux réalisés sur la cellule LGI présentée plus haut, l'élaboration d'une enceinte climatique en environnement contrôlé dénommée « STA-tron » a permis d'approfondir les recherches de l'Equipe Génie Civil dans le domaine de la simulation thermique des bâtiments et l'évaluation de leur consommation énergétique. Cette nouvelle installation vient compléter les études menées en environnement naturel car elle permet de s'affranchir d'un certain nombre d'erreurs de mesure propres aux instrumentations en environnement naturel (infiltrations, sollicitations climatiques variables) et de focaliser sur l'étude de phénomènes spécifiques (étude des systèmes en régime permanent, étude de la condensation etc.).

Cette nouvelle installation se destine principalement aux études suivantes :

#### ***Concernant l'étude des systèmes :***

- étude du système en régime permanent ;
- étude d'un système pour des conditions intérieures et extérieures ajustées ;
- amélioration de la prise en compte du fonctionnement dynamique ;
- évaluation précise de la puissance latente et sensible en régime dynamique ;
- étude d'un système à taux de charge et à taux de marche variables.

#### ***Concernant l'étude du comportement des matériaux :***

- étude du comportement des matériaux sans transfert aéraulique ;
- détermination des grandeurs physiques liées à l'absorption et à la désorption de l'eau par les matériaux.

La conception de cette installation a suivi les principes suivant :

- assurer un contrôle précis des ambiances climatiques ;
- permettre l'injection de sollicitations constantes ;
- permettre les essais d'autres composants du bâtiment ;
- centraliser la commande, le contrôle et les mesures ;
- permettre l'évolution de l'installation.

### 4.3.1 Caractéristiques principales

L'objectif de cette installation est de reproduire les conditions extérieures d'un bâtiment dans une enceinte dite « extérieure » et les conditions intérieures dans l'enceinte dite « intérieure ». Nous disposons donc de deux enceintes de 9 m<sup>2</sup> chacune, dont les conditions intérieures sont ajustées par des systèmes de traitement d'air extérieurs. Les enceintes sont constituées par des panneaux « isothermes » de chambre froide comportant deux tôles d'aluminium et une épaisseur d'isolant polyuréthane, ce qui nous permet de supposer que les échanges dans les enceintes sont adiabatiques.

L'installation est disposée dans la halle d'essai de l'IUT. Ainsi, elle n'est pas soumise aux rayonnements de courtes longueurs d'ondes et est peu sensible aux variations climatiques extérieures. D'autre part deux ouvertures ont été prévues dans la paroi de séparation des enceintes afin de disposer une bouche de soufflage et une bouche d'extraction de ventilation mécanique contrôlée (VMC). Ces ouvertures sont refermées en fonction des besoins des mesures. La figure ci-dessous donne une présentation générale de l'installation :

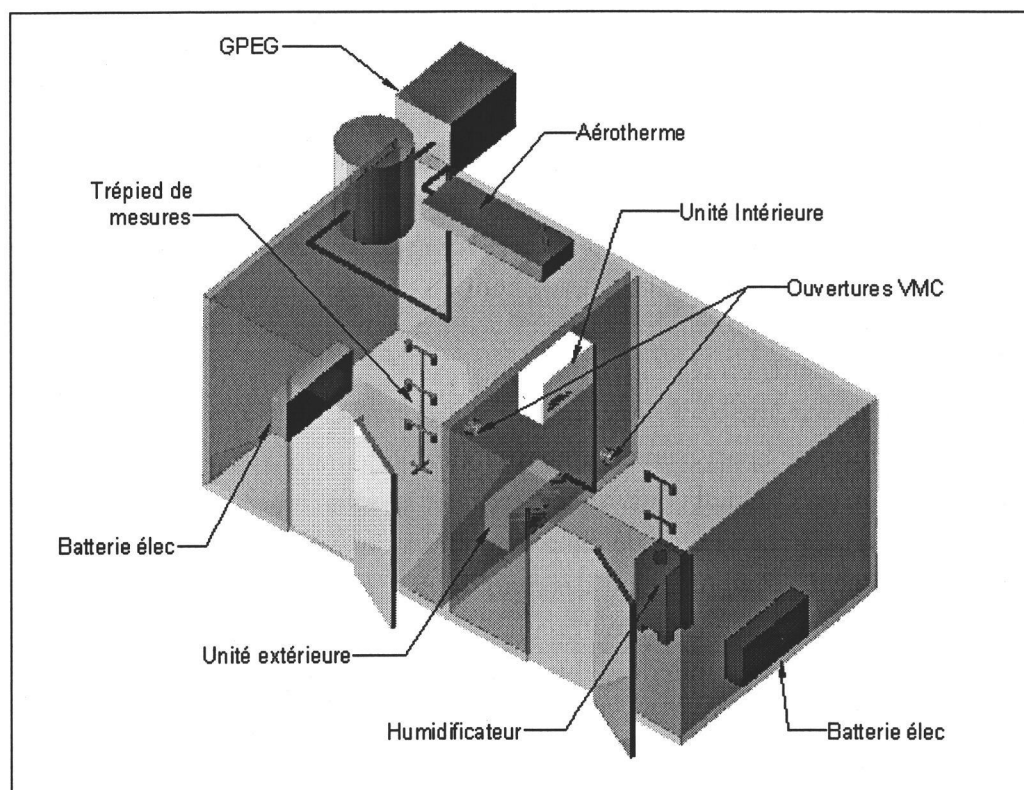


Figure 10 : Présentation générale du STAtron

### 4.3.2 Principe de commande et de contrôle des enceintes.

Les ambiances des deux enceintes sont contrôlées et pilotées depuis un poste informatique de contrôle situé dans une salle de mesure voisine. L'ordinateur communique les

consignes à un automate programmable (UNC) via un logiciel de gestion technique centralisée (GTC). Le choix d'un automate programmable et d'une GTC permet d'envisager l'évolution de l'installation vers un banc climatique capable de reconstituer des séquences réelles ou fictives.

L'enceinte intérieure est contrôlée en température et en humidité. La régulation se fait par deux triacs alimentant l'humidificateur et la batterie électrique. Les triacs assurent une bonne précision et une souplesse de commande. Il est ainsi possible choisir parmi deux types fonctionnements :

- régulation de la température ;
- sollicitations internes constantes.

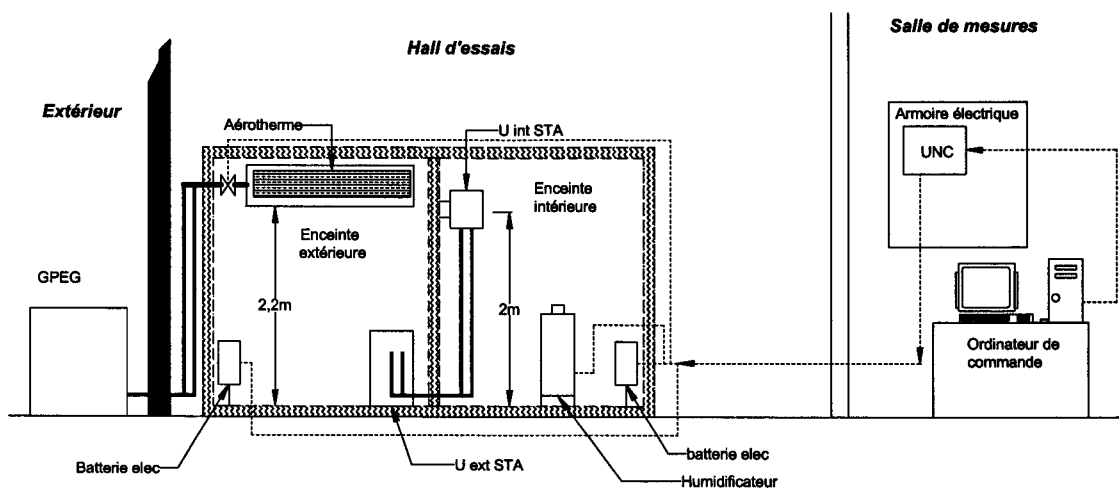


Figure 11 : schéma du STAtron et du dispositif de commande et de contrôle.

La régulation de température se fait de manière continue par le triac qui ajuste en permanence la fréquence du courant alimentant la batterie chaude. La batterie chaude est surdimensionnée en puissance pour répondre rapidement aux perturbations générées par le fonctionnement du split-system testé. Les sollicitations internes constantes correspondent à une fraction de puissance ajustée (entre 0 et 100%) de la puissance maximum de la batterie chaude. Cette commande se fait en programmant l'automate pour qu'il délivre une tension constante ajustée. Cette tension correspond à une fraction (entre 0 et 100%) du signal nominal envoyé par l'automate au triac pilotant la batterie. L'humidificateur est un réservoir d'eau de forme parallélépipédique à niveau constant chauffé par un thermo-plongeur. À terme, il est prévu d'équiper l'installation d'un injecteur de vapeur alimenté par un générateur de vapeur. Le but est de réaliser les apports de chaleur latente sans échange de chaleur sensible. Ce dispositif quasiment instantané permettra d'améliorer la reproduction des « steps » d'humidité.

L'enceinte extérieure n'est contrôlée qu'en température. La régulation se fait par l'automate commandant la position de la vanne trois voies alimentant en eau glacée l'aérotherme. La production d'eau glacée est assurée par un groupe de production d'eau glacée (GPEG) situé à l'extérieur du bâtiment. Un réservoir tampon permet une alimentation de l'aérotherme constante et évite le cyclage du groupe de production d'eau glacée. L'enceinte est aussi équipée d'une batterie chaude électrique.

### 4.3.3 Instrumentation

#### La chaîne d'acquisition

Ces deux enceintes et leurs systèmes sont entièrement instrumentés sur un principe de double mesure. L'installation doit pouvoir être validée. Pour cela l'instrumentation doit permettre de réaliser des bilans thermiques complets des enceintes. Par recoupement, il sera alors possible de vérifier si les mesures sont cohérentes.

La collecte des mesures est réalisée par une centrale d'acquisition Campbell Scientific 21x via un multiplexeur (Mux). L'utilisation du multiplexeur permet d'augmenter le nombre de capteurs utilisables et réduit le nombre de câbles de connexions entre les enceintes et la centrale d'acquisition. C'est une disposition intéressante dans notre cas, puisqu'elle permet de préserver une distance minimale entre les câbles de mesure à faible intensité et les câbles de puissance alimentant les batteries électriques et l'humidificateur. Cette distance est nécessaire pour éviter les interférences sur les mesures. L'emploi d'un multiplexeur permet aussi d'utiliser un câble blindé pour la connexion à la 21x. le principe de la chaîne d'acquisition des mesures est présenté à la Figure 12.

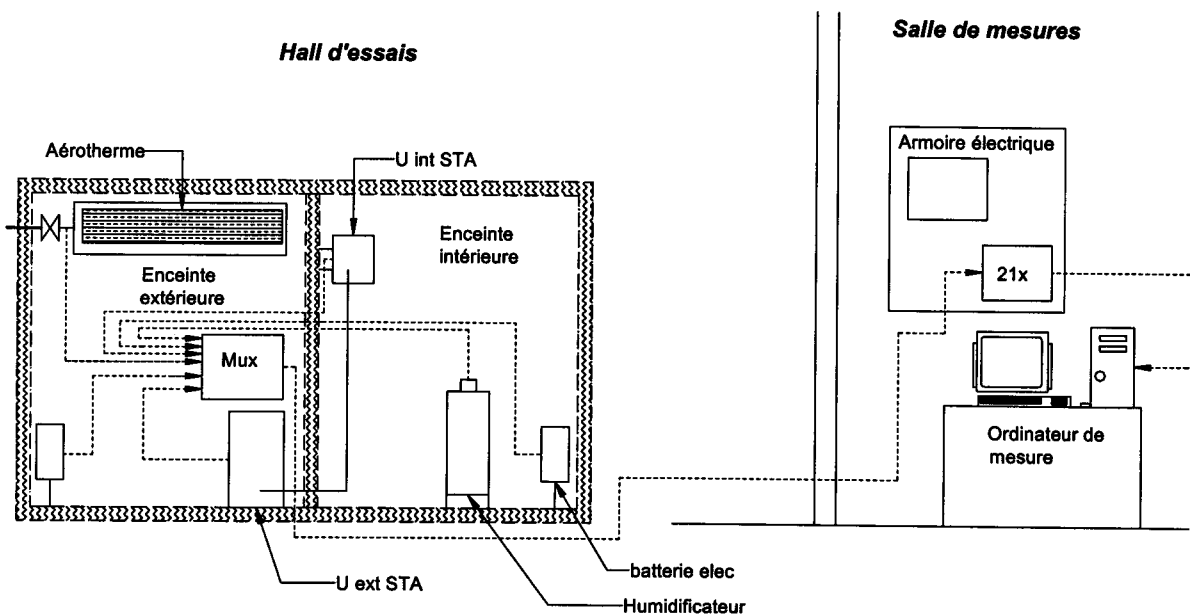


Figure 12: Chaîne d'acquisition des mesures du STA-tron.

### Les capteurs.

Les capteurs utilisés pour l'instrumentation sont identiques à ceux mise en place dans la cellule LGI. L'ensemble de ces capteurs et leurs caractéristiques sont présentés par Figure 13. Notons qu'à titre provisoire les mesures électriques sont réalisées à l'aide de petits capteurs autonomes de type EMU. Il est prévu de réaliser l'ensemble des mesures de puissance électrique par les capteurs collectés par le logiciel de GTC. La phase de préparation des capteurs est essentielle pour assurer la qualité des mesures. Ainsi tous les thermocouple ont subi un étalonnage sur place. Les capteurs de débit ont été étalonnés d'usine. Les thermo-hygromètres ont été expédiés chez le fournisseur pour une vérification générale et un étalonnage.

L'objectif est de multiplier les mesures afin de pouvoir réaliser des recoupements et de valider ainsi l'installation. Ainsi nous mesurons non seulement les caractéristiques du split-system étudié, mais nous relevons aussi toutes les grandeurs physiques qui permettront d'évaluer les puissances thermiques injectées dans le local. En écrivant les bilans thermiques des enceintes nous aurons une deuxième indication des puissances échangées par le système que nous comparerons aux valeurs données par les mesures sur le split lui même. L'ensemble des grandeurs physiques mesurées est représenté sur le schéma de l'installation ci-dessous.

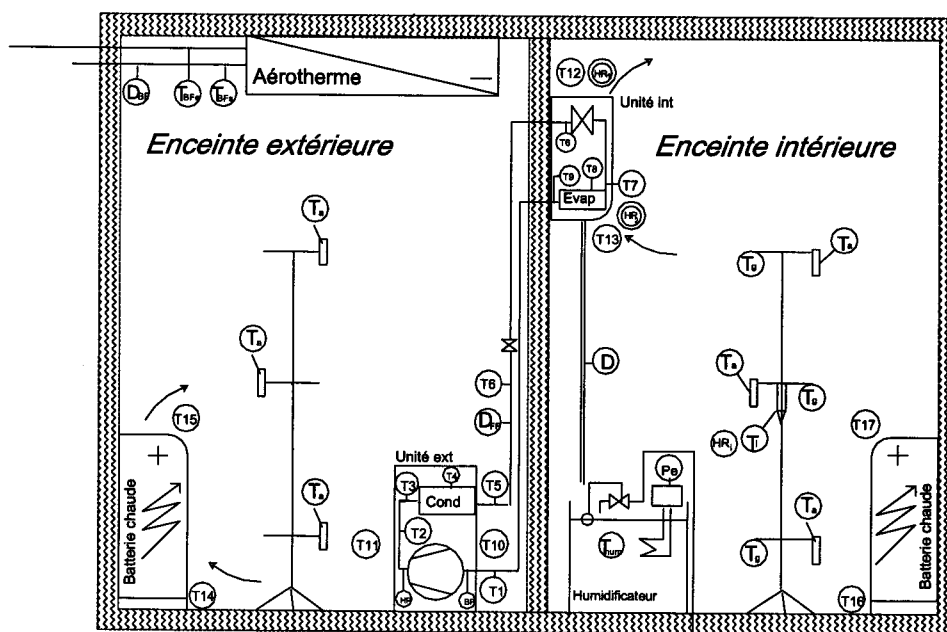


Figure 14 : Instrumentation dans le STA-tron.



## 5 Autres supports en environnement naturel

### 5.1 Introduction

La mise en place d'un environnement recherche à l'IUT a permis de créer un pôle de compétence en instrumentation des systèmes complexes. L'un des avantages de notre environnement expérimental est la portabilité et la rapidité de mise en œuvre. L'ensemble de la chaîne d'acquisition (centrales, capteurs et station météo) peut ainsi être déplacé pour l'instrumentation in-situ de sites réels.

A ce jour, les cinq chercheurs travaillant sur la plate-forme de l'IUT peuvent intervenir, en dehors de leurs activités de recherche pour la réalisation de contrats extérieurs. Cette compétence reconnue au niveau local et même national depuis plusieurs années s'est traduite par plusieurs contrats de recherche qui ont entre autre permis à l'équipe d'étoffer le parc de capteurs et matériel d'acquisition décrits dans le Tableau 3. Le caractère portable de notre environnement de mesure a en outre facilité la réalisation de ces contrats.

Ces contrats sont notamment (voir détail financier en Annexe D):

- le suivi expérimental de l'opération ECODOM (1998-2000) : convention Etat/UR sur financement SPIOM [SPIOM 98] ;
- l'expertise de logements dans les hauts de l'île de La Réunion au sujet de problèmes de condensation (2000) [SODEGIS 00];
- le suivi expérimental de l'opération expérimentale ECODOM en Guadeloupe, pour le compte d'un bureau d'étude local (1998) [SUNSTICE 98].

Ces contrats, outre le fait de financer en grande partie notre plate-forme expérimentale, contribuent également au développement de nos activités de recherche. Ainsi, les contrats précités ont permis l'instrumentation de logements en site réel dans des zones climatiques différentes (Hauts et Bas de l'île de La Réunion, Guadeloupe). Ces nouveaux supports expérimentaux en environnement naturel viennent compléter notre base de données. Les résultats expérimentaux et les fichiers de mesure obtenus peuvent être utilisés dans le cadre de la validation de codes de simulation.

### 5.2 Sites de La Trinité et de La Découverte, Ile de La Réunion (suivi expérimental de l'opération expérimentale ECODOM)

Afin d'évaluer les performances techniques et sociologiques réelles des logements ECODOM, une étude expérimentale a été réalisée à La Réunion et en Guadeloupe sur les premières opérations construites. Ce suivi expérimental permet d'avoir un retour d'expérience sur la qualité du confort thermique dans les logements ECODOM, et de faire certaines modifications si nécessaire.

Nous avons donc instrumenté durant deux saisons chaudes (1998-99 et 1999-2000) les deux premières opérations ECODOM, respectivement appelées opération « la Trinité » et la Découverte » à la fois dans des logements vides et occupés. Quatre logements non occupés

ont été instrumentés pour chaque opération. Les logements ont été choisis pour permettre de comparer un ensemble de paramètres tel que l'isolation thermique de la toiture et des parois et l'influence de la ventilation naturelle. Les grandeurs physiques mesurées dans les logements étaient : les températures sèches d'air, températures résultantes, humidités et vitesses d'air intérieures (voir Figure 15 et Figure 16). Nous avons en outre disposé sur le site une station météorologique portable afin d'enregistrer les variables climatiques responsables des conditions de confort à l'intérieur des logements.

L'ensemble de la méthodologie utilisée, des renseignements sur l'instrumentation des logements l'analyse des résultats et les conclusions a fait l'objet de trois rapports de recherche [Garde 98], [Garde 00a], [Garde 00b].

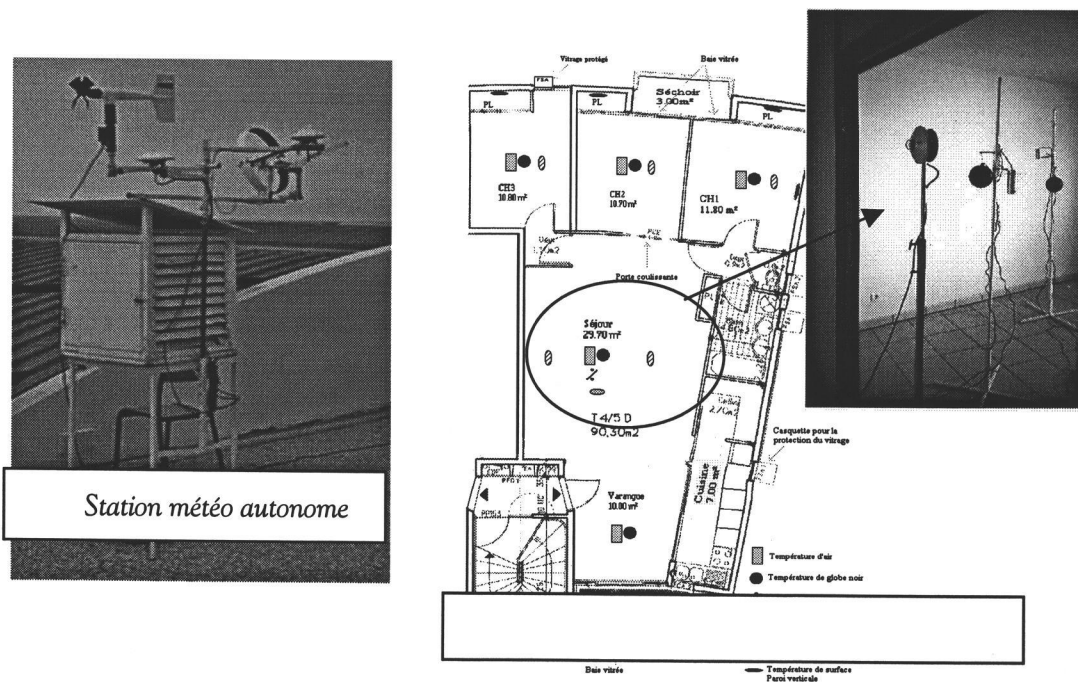


Figure 15 : Instrumentation de l'opération « La Trinité ».

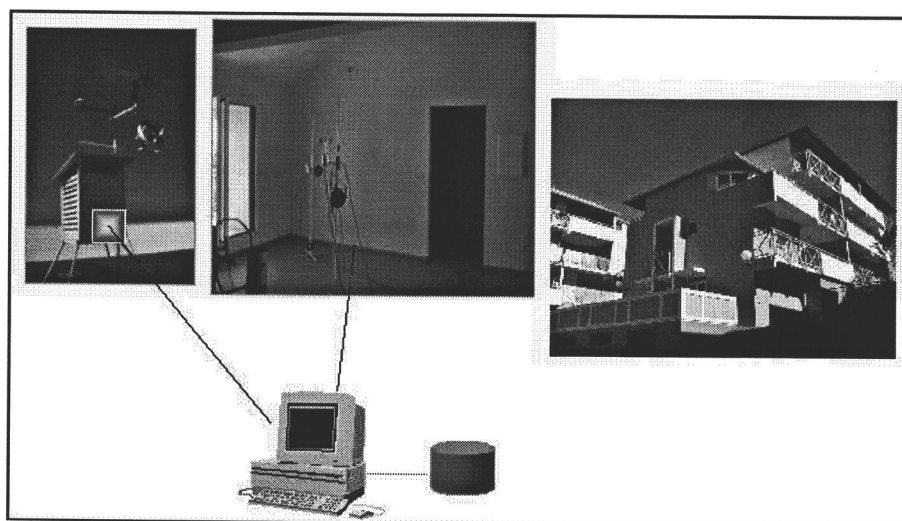


Figure 16: Instrumentation de l'opération « la Découverte ».

### 5.3 Site de l'Entre Deux et du Tampon, Ile de La Réunion

Cette étude menée pour le compte d'un maître d'ouvrage a eu pour but de définir les solutions optimales (sur le plan technique et économique) à mettre en œuvre pour remédier de manière durable aux dégradations dues à la condensation. Deux sites expérimentaux ont été instrumentés, l'un situé au tampon comportant 45 logements locatifs sociaux (LLS) et l'autre à l'Entre-deux de 34 LLS. Les pièces les plus dégradées des logements vides ont été instrumentées de manière précise. Les principales dégradations étant situées au plafond, nous avons mesuré les caractéristiques de l'air dans le faux-plafond et les températures de surface des différentes parties de la charpente. Les pièces de vie et les salles de bains des logements habités ont été instrumentées de manière réduite par des petits capteurs autonomes de température d'air et d'humidité relative. D'autre part afin de pouvoir réaliser des simulations numériques et de valider la description du bâtiment, les données météorologiques des sites ont été relevées grâce à des stations météorologiques autonomes.

L'analyse complète des résultats est présentée dans [Lucas 00].

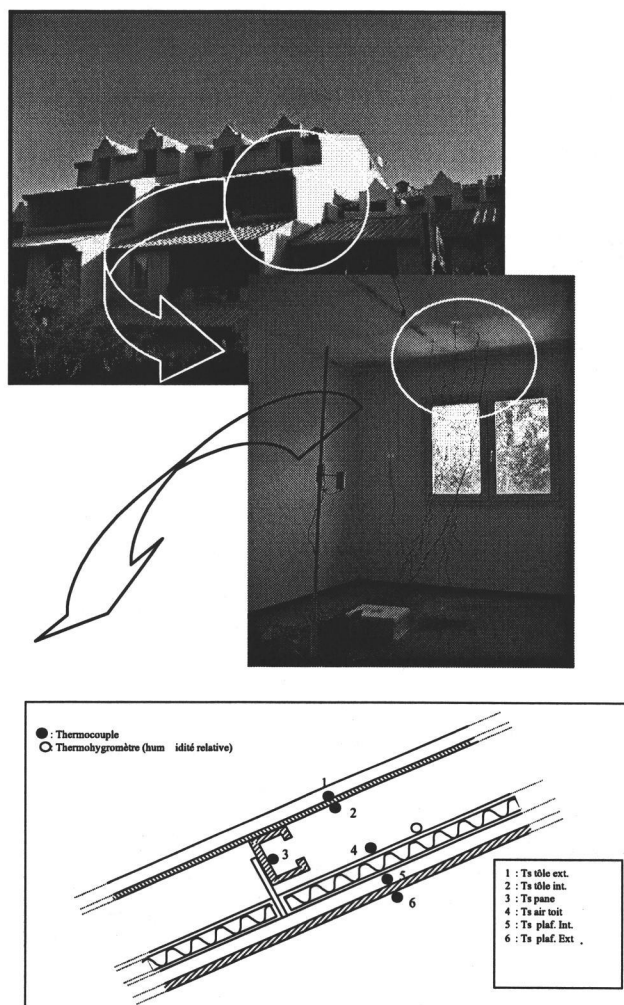


Figure 17 : Détail de l'instrumentation du site de l'Entre-Deux pour l'étude des phénomènes de condensation.

## 5.4 Site du Moule : Opérations SEMSAMAR et SAMIDEG Guadeloupe

Notre équipe est également intervenue en Guadeloupe pour instrumenter les premières opérations ECODOM.

A ce jour, la Guadeloupe dispose d'environ 400 logements bénéficiant de la qualification ECODOM, dont une centaine, construits en 1997-98, ont fait partie de la présente étude d'évaluation. Il s'agit de 50 LLS SEMSAMAR à Ste Rose et 32 LLS SAMIDEG au Moule.

A leur livraison en 1998, ces logements ont fait l'objet d'une étude instrumentée en saison chaude ayant pour but de vérifier l'efficacité des solutions techniques de confort thermique préconisées et mises en œuvre. La campagne de mesure portait sur un échantillon composé de 6 logements ECODOM des opérations citées précédemment et de 2 logements LLS non-ECODOM également récemment livrés.

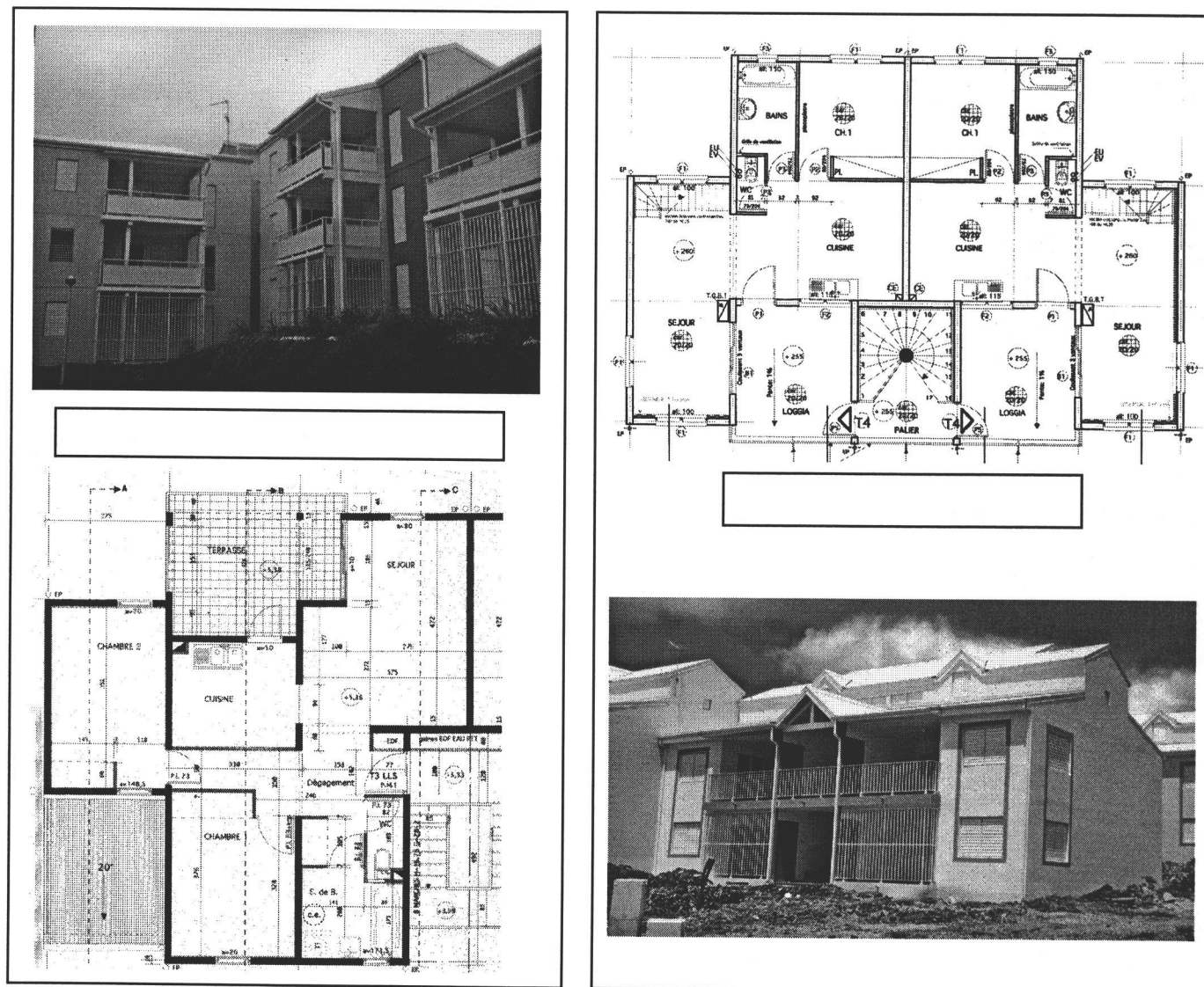


Figure 18 : Instrumentation en Guadeloupe.

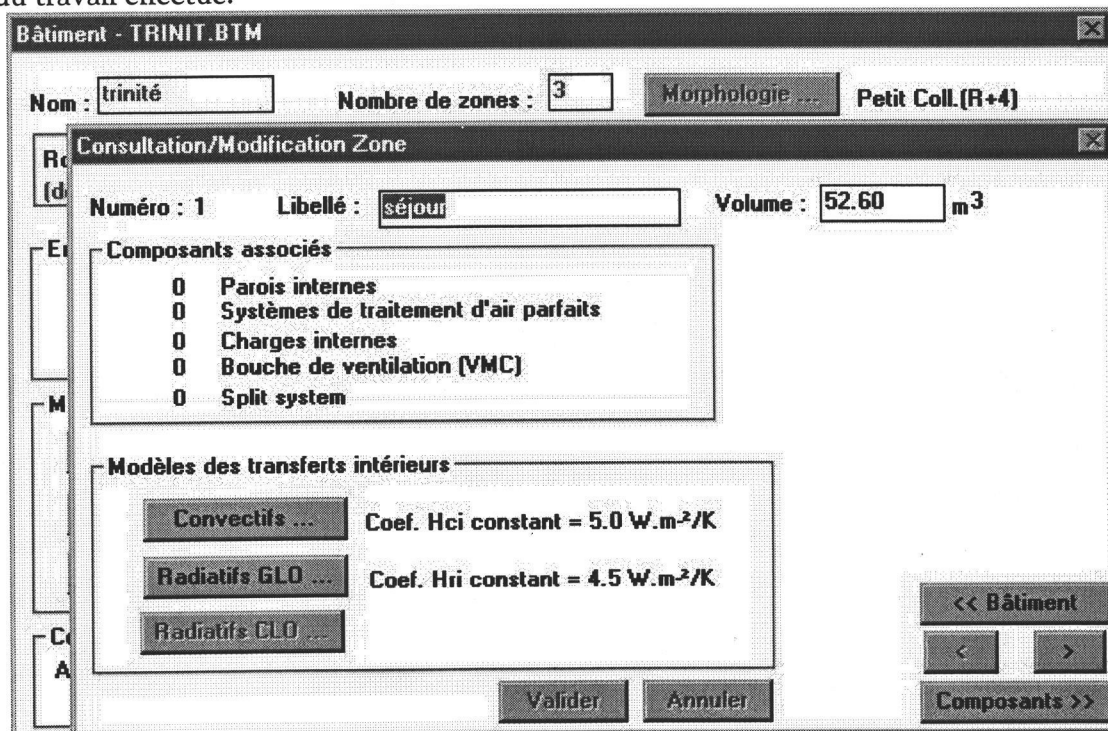
Lors de cette opération, des logements vides et occupés ont été instrumentés. De plus, une enquête sociologique a été réalisée comme à La Réunion afin d'évaluer la satisfaction des usagers de ces logements [Seauve 00].

## 6 Outils numériques de modélisation

### 6.1 CODYRUN

L'un des premiers thèmes de l'équipe était celui de la modélisation numérique du comportement thermo-aéraulique de l'habitat. Le double objectif était celui d'un outil d'aide à la conception et de recherche, nous imposant le développement d'un outil multi-modèle. Ce cahier des charges nous a mené au développement d'un outil multizone spécifique (CODYRUN), intégrant en particulier les transferts aérauliques, parmi d'autres aspects spécifiques au climat tropical humide. 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 actuelle 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.



## 6.2 TRNSYS

Une segmentation des codes détaillés de simulation thermique des bâtiments fait apparaître deux voies, l'une constituée des codes spécifiques tels que le nôtre (CODYRUN) et l'autre où se trouvent les utilisateurs du type56 au sein de l'environnement de simulation 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, ...). Un exemple de panneau d'assemblage est présenté en page 19.

La philosophie des deux groupes est assez différente, le premier s'attachant à intégrer au sein d'un code « maison » un ensemble de modèles (composants et phénomènes) dont le développement est entièrement maîtrisé au sein groupe. Pour le second, la stratégie est constructiviste, le modèle final étant obtenu par assemblage de types (de briques) conçues pour certaines en interne, mais pour d'autres récupérées au sein du club formé par les utilisateurs de TRNSYS. Grâce aux apports déterminants de plusieurs membres de l'équipe, une possibilité tirant partie simultanément de tous nos développements précédents (modélisation de composants spécifiques, validation, ...) et s'inscrivant pleinement dans la philosophie de TRNSYS s'est dessinée à nous : celle du portage de CODYRUN sous TRNSYS, notre code devenant alors une brique utilisable par l'ensemble des utilisateurs de ce dernier environnement (200 universités dans le monde). Le type59 (CODYRUN sous TRNSYS) est à ce jour opérationnel et rencontre un écho très favorable dans la communauté [Bastide 01].

## 6.3 MATLAB

Nous utilisons cette plate-forme à des fins de prototypage rapide d'applications. En utilisant les boîtes 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 celui de l'analyse de sensibilité, MATLAB sert de banc d'essai avant intégration dans CODYRUN.

## 6.4 RUNEOLE

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. 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.

## 6.5 STAR-CD :

Star CD fait partie de la famille des codes détaillées de Mécanique des Fluides appelés code CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces codes à forte orientation recherche, permettent de modéliser les transferts thermo-aérauliques à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments, de manière très précise, grâce à un maillage très fin du volume d'étude. En d'autres mots, ce type de code permet de modéliser les écoulements d'air dans une salle de classe par exemple et de visualiser les flux d'air dans les espaces pour mieux appréhender les effets dues à la ventilation naturelle. Nous sommes la seule équipe de recherche de l'Ile à utiliser ce type de code. Ceci nous permettra de mieux modéliser les écoulements et d'avoir une approche plus précise sur le confort thermique dans le bâtiment.

## 7 Moyens

### 7.1 Moyens matériels et mode de financement

Le tableau ci-dessous récapitule le coût et le type de financement (extérieur, contrats, IUT) utilisé pour mettre en place la plateforme expérimentale.

| <i>Dénomination</i>   | <i>Qté</i> | <i>Fabrication</i>        | <i>Financement</i>                         |
|---|------------|---------------------------|--|
| <b>Cellules en environnement naturel</b>                    |            |                           |  |
| Cellule LGI   | 1          | BERD                      | Convention ADEME/UR                        |
| Split système   | 1          | Carrier                   | Convention Carrier/IUT                     |
| Débitmètres   | 2          | Kobold                    | Contrat recherche                          |
| Capteurs de pression  | 3          | Kobold                    | Contrat recherche                          |
| Cellules ISOTEST  | 5          | Local IUT                 | Auto financement IUT                       |
| Supports bétonnées  | 7          | Ext.                      | Auto financement IUT                       |
| Station météo   | 1          | Campbell<br>Kipp et Zonen | Contrat recherche                          |
| Centrales d'acquisition                                     | 4          | Campbell                  | Contrats recherche                         |
| Multiplixeurs   | 5          | Campbell                  | Contrats recherche<br>Partenariat PLAST OI |
| Fluxmètres  | 15         |                           | Contrat recherche                          |
| Anémomètres fil chauds                                      | 3          | Dantec                    | Contrats recherche                         |
| Anémomètres à coupelles                                     | 3          | Campbell                  | Contrat recherche                          |
| Divers : TC, PT100,<br>accessoires                          | Ens.       | Bioblock                  | Contrat recherche                          |
| <b>Sous-total Cellules</b>                                  |            | <b>424 kF</b>             |  |
| <b>Cellule d'essai en environnement contrôlé : STA-TRON</b> |            |                           |  |
| Enceintes adiabatiques<br>STATron                           | Ens.       | Sté PLAST OI              | Convention Plast OI/IUT                    |
| Régulation<br>évaporateur/condenseur                        | Ens.       | Sté ICART                 | Convention ADEME/IUT                       |
| Débitmètres fréon/eau                                       | 2          | Kobold                    | Contrats recherche                         |
| Capteurs de pression  | 3          | Kobold                    | Contrats recherche                         |
| Split-systèmes  | 2          | Carrier                   | Convention Carrier                         |
| Boîtes blanches   | 20         | Testo                     | Contrats recherche (SPIOM)                 |
| Centrale/Mux  | 2          | Campbell                  | Contrat recherche                          |
| Logiciels GTC   | Ens.       | Satchwell                 | Convention<br>EnergieConcept/IUT           |
| <b>Sous-total STA-TRON</b>                                  |            | <b>361 kF</b>             |  |
| Bureaux / établis<br>PC                                     | Ens.<br>4  |                           | Contrat recherche<br>Contrat recherche     |
| <b>Montant Total</b>  |            | <b>845 kF</b>             |  |

Tableau 3 : Détails des capteurs et matériels disponibles et de leur mode de financement.



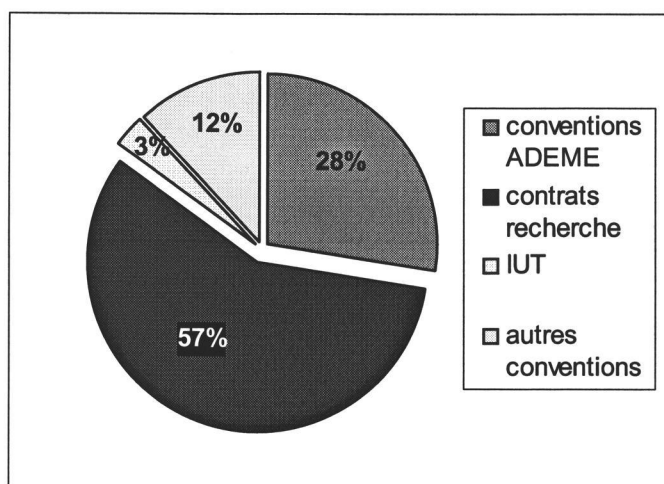


Figure 19 : Origine du financement de la plate-forme expérimentale.

Le coût global de la plate-forme expérimentale telle qu'elle a été décrite dans ce mémoire se monte à 845 kF (sur la période 1998-2001).

Il faut souligner le fait que l'IUT a participé financièrement à la réalisation des dalles supports pour la plate-forme en environnement naturel et que l'ADEME a financé à hauteur de 50% la cellule LGI et le STA-Tron (ce qui représente 28% du montant total).

Il est à noter que la majeure partie du financement provient de contrats de recherche extérieurs réalisés par les membres de l'équipe (57%). Les contrats réalisés et ayant servi à financer en partie notre environnement sont listés en Annexe C du présent mémoire.

## 7.2 Moyens en surfaces de recherche à l'IUT

Outre l'emprise au sol des deux plates-formes (250 m<sup>2</sup> pour la plate-forme en environnement naturel et 50 m<sup>2</sup> pour le STA-Tron), un espace de recherche a été aménagé dans la halle d'essais de l'IUT. Cet espace comprend 40 m<sup>2</sup> de bureaux pour accueillir quatre chercheurs et 120 m<sup>2</sup> pour la préparation des manipulations (étalonnage des capteurs de température, test d'acquisition) et le stockage du matériel (centrales d'acquisitions, capteurs divers, bobine de thermocouple etc...)

L'équipement des bureaux a été financé grâce aux contrats de recherche.

Ainsi, le total des surfaces de recherche à l'IUT est estimé à ce jour (novembre 2001) à 460 m<sup>2</sup> (voir tableau récapitulatif ci-dessous) :

| Localisation  | Surface (m <sup>2</sup> ) |
|---|---------------------------|
| Bureaux chercheurs  | 40 m <sup>2</sup>         |
| Salle de mesure   | 120 m <sup>2</sup>        |
| Espace recherche dans halle d'essai (STA-Tron)                              | 50 m <sup>2</sup>         |
| Plate-forme expérimentale en environnement naturel (cellule LGI + Isotest): | 250 m <sup>2</sup>        |
| <b>Total surfaces recherches</b>  | <b>460 m<sup>2</sup></b>  |

Tableau 4 : Détail récapitulatif des surfaces de recherche.

### 7.3 Moyens Humains

A l'heure actuelle, deux enseignants-chercheurs (Laetitia Adelard et moi même), un ATER (Thierry Mara) et deux doctorants (Frédéric Miranville et Franck Lucas) exploitent l'environnement qui vient d'être présenté. L'effectif est essentiellement composé de personnes en poste à l'IUT de Saint-Pierre (excepté Thierry Mara) qui ont été recrutés sur les supports créés lors de l'ouverture du département Génie Civil (1998).

La mise en place de l'environnement de recherche a profité à plusieurs stagiaires à des niveaux différents de formation. Ainsi, nous avons accueilli à l'IUT plusieurs étudiants de maîtrise, DEA ou école d'ingénieur qui ont pu acquérir des compétences certaines en instrumentation et qui participent chaque année à l'amélioration de notre environnement expérimental. Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des stagiaires et les supports expérimentaux sur lesquels ceux-ci ont travaillé.

| Support                               | Nom                   | Stage                                     | Année |
|---------------------------------------|-----------------------|---|-------|
| ISOTEST/cellule LGI                   | Miranville            | DEA Mécanique Energie                     | 1999  |
| Cellule LGI (Passif)                  | Harimala              | Stage de DUMEE (bac+5)                    | 1999  |
|                                       | Razanamanampisoa      |   |       |
| Cellule LGI (Système)                 | Despres               | Stage de Maîtrise Physique et Application | 1999  |
| Météo (mesure de température du ciel) | Sinacouty, Floricourt | Travail d'Etude et de Recherche           | 2000  |
|                                       |                       | Maîtrise de Sciences Physique             |       |
| Cellule LGI (Système)                 | Robert, Thiaw-Thi     | Travail d'Etude et de Recherche           | 2000  |
|                                       |                       | Maîtrise de Sciences Physique             |       |
| STA-Tron                              | Bastide Alain         | DEA Mécanique Energie                     | 2001  |
| STA-Tron                              | Cornejo Monica        | Ingénieur, Université de Séville          | 2001  |

Tableau 5 : Liste des stagiaires impliqués dans la mise en place de l'environnement de recherche.

Nous souhaitons continuer dans cette voie en proposant chaque année plusieurs stages dont le sujet tourne autour de l'instrumentation et la validation de modèles car cela permet de à la fois de donner à nos étudiants une formation à la recherche intéressante tout en faisant évoluer notre environnement recherche, d'autant plus que nous disposons depuis peu de structures d'accueil adaptés pour nos étudiants (bureaux et salles de mesure).

## 8 Retombées en terme de publications

La présentation de la plate-forme expérimentale de l'IUT a fait l'objet d'une communication [Miranville 99c]. Les premiers résultats expérimentaux sur les PMR ont été présentés dans une publication à la revue *Renewable Energy* [Miranville 00b] et au congrès français de Thermique SFT 2000 [Miranville 00a].

L'instrumentation spécifique de la cellule LGI (pose de thermocouples dans la dalle béton) a permis à deux chercheurs de l'équipe de proposer lors d'un congrès récent des méthodes intéressantes dans la validation de codes de simulation basées sur l'utilisation des algorithmes génétiques et des capteurs logiciels [Lauret 01b], [Boyer 01].

Les séquences de mesure effectuées sur la cellule LGI à Saint-Pierre et à Saint-Denis ont permis de vérifier le principe de corroboration sur le modèle de la cellule et de présenter les résultats de validation à la revue *Energy and Buildings* [Mara 01a]. Une autre publication est en cours de soumission à *Transactions of ASME* [Mara 01b].

En ce qui concerne la validation du couplage enveloppe/système, les résultats obtenus sur la cellule LGI ont permis de présenter tout récemment une publication à *ASHRAE Transactions* [Garde01e].

Les expérimentations menées sur les sites réels en environnement naturel ont également permis de traiter les problèmes de condensation dans les logements, en abordant à la fois les aspects modélisation et instrumentation. Les résultats ont été présentés dans la revue *Energy and Buildings* [Lucas 01a] et au dernier congrès CLIMA 2000 [Lucas 01b].

De plus, les campagnes de mesure dans les logements ECODOM ont servi d'éléments de validation aux modèles en pression utilisé dans notre code de simulation pour la prise en compte des transferts aéauliques par les grandes ouvertures [Boyer 99]. Enfin, par une instrumentation spécifique dans ces même logements (pyranomètres placés sur un plan vertical derrière la fenêtre) et une comparaison mesure/modèle, nous avons pu améliorer l'algorithme de calcul des flux radiatifs entrant dans le logement [Lauret 01a].

Le suivi expérimental des opérations ECODOM a également fait l'objet d'une publication dans la revue *Solar Energy* [Garde 01a]. La validation expérimentale appliquée sur les logements réels a également été présentée à CLIMA 2000 [Garde 01d] et fait l'objet d'une publication soumise à la revue *Building and Environment* [Garde 01f].

## 9 Conclusion et perspectives

Nous pouvons voir au travers de la productivité de l'équipe en terme de publication et communications que l'environnement mis en place à l'IUT constitue un support important pour la continuité de nos activités recherche.

La plate-forme expérimentale décrite dans ce chapitre est opérationnelle et a permis, comme illustré précédemment, des études répondant à des attentes liées à des préoccupations énergétiques. Elle constitue également un environnement d'étude complet, dédié à la recherche en thermique du bâtiment, aussi bien expérimentale que théorique, et ouvre par conséquent de nombreuses voies de prospections scientifiques. Les résultats issus des recherches menées sur cette plate-forme, unique dans les Départements d'Outremer, pourront être utilisés par tous les membres de l'équipe Génie Civil Thermique de l'Habitat pour permettre une meilleure prise en compte des caractéristiques en service des composants du bâtiment, qu'ils soient actifs ou passifs et permettre la généralisation de l'habitat bioclimatique.

En termes de perspectives, un emplacement pour une deuxième cellule expérimentale à grande échelle, jumelée à la cellule LGI, a été prévu, de façon à pouvoir étudier les phénomènes de couplages thermiques et aérauliques de bâtiments, et ceci, en grandeur nature. Il pourra s'en suivre des études expérimentales ou théoriques sur de tels phénomènes, encore peu étudiés.

## Chapitre 2

# Etat d'avancement de nos travaux en matière de validation expérimentale et d'analyse de sensibilité

*Le chapitre 1 a présenté les supports expérimentaux utilisés par notre équipe dans le cadre de la validation expérimentale de codes de simulation.*

*Ce chapitre va plutôt se concentrer sur les méthodes d'analyse de sensibilité et de comparaison mesure/modèle que nous utilisons dans le cadre de la validation de modèle globaux ou de modèles élémentaires.*

*Nous illustrerons chaque étape du processus de validation (analyse de sensibilité et comparaison mesure/modèle) par des études réalisées au sein de notre équipe sur la cellule LGI.*

*Nous conclurons enfin sur les travaux en cours et sur les perspectives associées à cette thématique.*

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>La validation de logiciels en Thermique du Bâtiment .....</b> | <b>69</b> |
| 1.1      | Introduction .....   | 69        |
| 1.2      | La méthodologie de validation globale .....                      | 70        |
| 1.3      | Etat d'avancement de nos travaux (1994-2001) .....               | 72        |
| <b>2</b> | <b>Le protocole BESTEST .....</b>                                | <b>76</b> |
| 2.1      | Introduction .....   | 76        |
| 2.2      | Déroulement de la procédure .....                                | 77        |
| 2.3      | Application de BESTEST à CODYRUN .....                           | 77        |
| 2.4      | Perspectives .....   | 78        |
| <b>3</b> | <b>L'analyse de sensibilité .....</b>                            | <b>79</b> |
| 3.1      | Introduction .....   | 79        |
| 3.2      | Méthodologie.....  | 79        |
| 3.3      | Description de la méthode proposée .....                         | 80        |
| 3.4      | Analogie avec l'analyse de régression .....                      | 81        |
| 3.5      | Evaluation de l'influence des paramètres .....                   | 82        |
| 3.6      | Décomposition de la variance .....                               | 83        |
| 3.7      | Mise en œuvre pratique.....                                      | 83        |
| <b>4</b> | <b>Recherche de corrélations entrées / résidu .....</b>          | <b>85</b> |
| 4.1      | Analyse classique .....  | 85        |
| 4.2      | La transformée de Fourier à court terme.....                     | 85        |
| 4.3      | Application à des signaux réels.....                             | 86        |
| <b>5</b> | <b>Conclusion et Perspectives .....</b>                          | <b>91</b> |

# 1 La validation de logiciels en Thermique du Bâtiment

## 1.1 Introduction

Une étude comparative du National Research Energy Laboratory (NREL, ex. SERI : Solar Energy Research Laboratory) impulsée par le Département de l'Energie des Etats-Unis (DOE) a mis en évidence des différences considérables entre le comportement dynamique d'un bâtiment prédits par certains logiciels et le comportement mesuré sur le site, même pour des configurations très simples [Judkoff 88]. Or, ces outils de simulation jouent un rôle capital dans la conception de nouvelles générations de bâtiments [Garde 97]. Leur mauvaise performance peut donc discréditer leurs utilisations.

Nous avons vu au chapitre 1 qu'il existe, au niveau international, une dynamique consistant à encourager la validation globale des codes de calculs du comportement thermique de bâtiments. L' Agence Internationale de l'Energie (IEA) participe à la mise en place d'outils d'aide à la validation globale des programmes en thermique du bâtiment. En particulier, la CCE a financé un programme basé sur des outils d'aide à la validation expérimentale des cellules test de PASSYS [Strachan 93], [Palomo 91], [Jensen 91] principalement appliqué au code ESP-r<sup>1</sup> [ESRU 96]. L'IEA, via le Solar and Heating Cooling Program (SHC) a mis en place un ensemble de 35 études (appelées annexes) réalisées par différents groupes de recherche travaillant sur un aspect bien particulier de l'annexe considéré [Hong 2000], [IEA-ECBCS]. Ces groupes sont généralement des laboratoires de recherche dont le BRE (Building Research Establishment, U.K.), le NREL (USA) et le LESO-PB (Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, Suisse) ou des professionnels comme EDF et le bureau d'études Neymark & Associates (USA).

Parmi les outils développés dans le cadre de ces annexes nous pouvons citer : la procédure de comparaison inter-logiciels BESTEST<sup>2</sup> [Judkoff 95b] dans le cadre de la Task 12 annexe 21 et les logiciels d'analyse de sensibilité de modèles LISA & MISA<sup>3</sup> [Fürbringer 99] dans le cadre de l'annexe 23. Faisant suite à la Task 12, la Task 22 qui est également détaillée dans le chapitre 3 du mémoire focalise sur le développement d'outil de modélisation basé sur l'approche orienté objet (Object-Oriented Simulation Environments), sur une extension des comparatives aux systèmes (HVAC BESTEST) et enfin sur la validation expérimentale à l'aide de cellules expérimentales (ETNA et GENEC).

Enfin, notons que la tendance est actuellement de travailler en collaboration afin d'harmoniser et de capitaliser les efforts de chacun et d'échanger les données expérimentales (dites de hautes qualités) qui sont ne sont pas très abondantes [Lomas 91].

---

<sup>1</sup> ESP : *Energy Simulation Program, University of Strathclyde.*

<sup>2</sup> BESTEST : *acronyme pour Building Energy Simulation Tests.*

<sup>3</sup> MISA : *acronyme pour Multirun Interface for Sensitivity Analysis et LISA : pour Library for Sensitivity Analysis.*

## 1.2 La méthodologie de validation globale

La méthodologie de validation utilisée pour notre code a été mise en place depuis plusieurs années [Dalicieux 93]. Elle est basée sur le travail initié à l'origine par Bloomfield [Bloomfield 88], Lomas [Lomas 91], Judkoff [Judkoff 88] et Palomo [Palomo 91].

Un code de simulation est soumis à trois sources d'erreurs qui sont :

- la mauvaise implémentation numérique (erreurs de programmation,...) ;
- les erreurs imputables à l'utilisateur (erreur de description de l'habitat, etc...) ;
- les erreurs de modélisation qui sont plus liées à la méconnaissance de certains paramètres du modèle ou à des hypothèses simplificatrices trop fortes.

La méthodologie de validation globale de logiciels a pour but d'éliminer ou du moins de réduire ces sources d'erreur et repose sur six étapes appartenants à deux familles différentes :

### Test à priori (étapes de vérification)

- vérification de la théorie de base;
- vérification du bon fonctionnement numérique;
- comparaison inter-logiciels;
- vérification analytique des modèles élémentaires.

### Test à posteriori

- analyse de sensibilité paramétrique;
- comparaison mesure/modèle.

Les quatre premières sont appelées étapes de vérification ou encore étapes de test à priori [Fraedrich 99]. les étapes de vérification consistent surtout à s'assurer que les modèles sont correctement implémentés.

Les deux dernières étapes sont appelées test à posteriori et désignent les phases de validation expérimentale qui comprend l'analyse de sensibilité de modèle et la comparaison mesure/modèle. Cette phase s'attache à vérifier que les résultats de simulation sont suffisamment proches des résultats de mesures afin de s'assurer que le modèle représente bien la réalité et que les hypothèses de modélisation sont acceptables.

### 1.2.1 Test à priori

La première étape consiste à s'assurer que les modèles intégrés dans le logiciel de simulation sont corrects, ne pose pas de problème particulier dès lors qu'ils sont reconnus et utilisés par la communauté scientifique (c'est le cas de l'analogie thermo-électrique ou de la méthode des différences finies pour la conduction ...).

La vérification du bon fonctionnement numérique est sans doute l'une des étapes les plus importantes de la phase de vérification. Peu de simulations sont nécessaires, il ne s'agit donc pas d'une étape coûteuse (sinon qu'en temps). Ce type de vérification est réalisé en général lors du développement du code.

La comparaison inter-logiciel est une étape à part dans le processus de validation globale car il s'agit de comparer le logiciel à d'autres codes de simulation qui peuvent être considérés



comme plus précis ou mieux validés ou encore présumés plus précis. Dans ce cadre, la procédure BESTEST [Judkoff 95] est devenue la référence pour identifier et diagnostiquer des erreurs de codes.

La vérification analytique des modèles élémentaires est une étape très importante. Elle permet de vérifier que le modèle numérique est en adéquation avec le modèle conceptuel [Kleijnen, 95]. Cette vérification reste toutefois difficile à appliquer dans la mesure où dans le cadre de la thermique du bâtiment, il existe peu de problèmes à solution analytique. De plus, il s'agit généralement de cas simples et non réalistes. C'est le cas par exemple du problème de la conduction thermique à travers une paroi soumise à un échelon de température ou de flux de rayonnement [Zmeureanu, 87]. Certaines équipes telles que l'Energy Monitoring Company (EMC, U.K.) et le DMU (De Monfort University, U.K.) ont travaillé sur le calcul de solutions analytiques de sous-modèles utilisés dans les codes de simulation pour le compte l'IEA dans le cadre de l'annexe 21 [Martin, 94], [Lomas, 87]. Plus récemment, Guyon [Guyon 99] a proposé une batterie de tests analytiques pour les deux logiciels développés par EDF : CLIM2000 [EDF/DER 98] et CASIS. Dans notre cas, Boyer s'est attaché à vérifier les résultats de CODYRUN que quelques cas analytique.

### 1.2.2 Test à postériori (validation expérimentale)

Enfin, les deux dernières phases sont considérées comme indissociables et constituent l'étape de la validation expérimentale de modèles de bâtiments. Cette étape consiste :

- ✓ à réaliser une analyse de sensibilité paramétrique pour :
  - étudier l'importance des paramètres sur les résultats du modèle de bâtiment considéré et de déterminer, par la même, les paramètres les plus influents (à mesurer avec précision lorsqu'une campagne de mesure est programmée);
  - confronter les résultats de mesures à ceux de la simulation en tenant compte de leur intervalle d'incertitude respectif.
  
- ✓ à procéder à la comparaison mesure\modèle qui requiert :
  - la mise en place d'une expérimentation
  - la comparaison des prédictions aux mesures. Dans le cas d'un écart important entre la simulation et la mesure, il faut alors déterminer l'origine de l'erreur. Pour cela, on procède à l'analyse du résidu (écart mesure - prédiction).

### 1.3 Etat d'avancement de nos travaux (1994-2001)

La méthodologie de validation globale a été initiée lors de mes travaux de thèse [Garde 97] et appliquée dès 1994 à la validation de notre code de simulation CODYRUN. Historiquement, les étapes de validation ne sont pas déroulées de manière chronologique.

#### 1.3.1 Test à priori

Concernant la phase des test à priori, Boyer s'est attaché à s'assurer de la bonne intégration numérique des sous-modèles par l'application de tests de cohérence et de comparaisons avec le logiciel CODYBA<sup>4</sup> [Boyer 93]. Cette étape de vérification a été reprise par Forestier [Forestier 96] et [Garde 96] et a permis de corriger certaines erreurs de programmation.

La phase a été reprise ensuite par Soubdhan [Soubdhan 99] et [Mara 00] qui ont appliqué la procédure BESTEST à CODYRUN. Nous en dirons d'avantage dans la section dédiée à BESTEST.

| Tests à priori   | Ce qui a été fait dans notre équipe (1994-2001)   |
|--|---|
| Vérification de la théorie de base des modèles élémentaires (ou sous-modèle) | Les sous-modèles intégrés dans CODYRUN sont extraits de la littérature [Boyer 93] et ont à fortiori subi une étape de validation. Par contre, pour les modèles que nous avons développés nous avons procédé à des comparaisons mesure \ modèle [Lucas 96].<br>L'application de la procédure BESTEST nous a conduit à vérifier certains modèles et à cibler ceux dont l'application est limitée (le meilleur exemple est le modèle R2C pour la conduction) [Mara 00] |
| Vérification du bon fonctionnement numérique                                 | Principalement des tests de cohérence ; [Boyer 93], [Boyer 99], [Forestier 96] et [Garde 97]<br>De la même manière, BESTEST nous a permis de détecter et de corriger la mauvaise implémentation numérique de certains modèles élémentaires [Mara 00]  |
| Comparaison inter-logiciels  | Avec le logiciel CODYBA pour des modèles monozones [Boyer 93].<br>BESTEST est une procédure basée sur la comparaison inter-logiciels [Soudhan 00], [Mara 00]<br>Avec le type 56 de TRNSYS pour les modèle multizones [Lucas   |
| Vérification analytique des modèles élémentaires                             | Vérification de quelques sous-modèles sur des cas monozones [Boyer 93]  |

Tableau 1 : Liste des tâches effectués dans l'Equipe Génie Civil Thermique de l'Habitat pour les phases de tests à priori appliquées à CODYRUN.

<sup>4</sup> Logiciel développé à l'INSA de Lyon.

### 1.3.2 Validation expérimentale

Je me suis prioritairement attaché lors de ma thèse à mettre en place les supports expérimentaux et la méthodologie globale nécessaires à la phase de validation expérimentale, sachant que cette première étape servirait de socle pour le développement futur de nos activités liées à la validation.

Nous avons donc dans un premier temps mis en places les supports expérimentaux de l'Hermitage et de la cellule LGI décrits dans le chapitre 1 ainsi que l'ensemble de la chaîne d'acquisition associée [Mara 96].

Concernant l'analyse de sensibilité, nous avons appliqué au modèle de la cellule LGI l'analyse de sensibilité différentielle approchée qui a permis de faire une première identification des paramètres les plus influents [Garde 97]

La comparaison mesure/modèle a été effectuée en ayant recours aux techniques de traitement du signal (Densité Spectrale de Puissance, cohérence des signaux entrées/sorties), de manière à mettre en évidence les données météorologiques corrélées au résidu afin de remonter à l'origine de l'erreur et éventuellement d'apporter des corrections au niveau du modèle. Une application dédiée à la validation des codes de simulation de bâtiments sous environnement MATLAB a été développée spécifiquement [Mara 98]. Par contre, la méthode a montré ses limites quand les entrée étaient corrélées entre elles (par exemple, les données météorologiques).

Une méthode originale d'analyse de sensibilité basée sur l'analyse spectrale a ensuite été proposée par Mara [Mara 00a]. Cette méthode outre l'aspect sensibilité permet l'approximation du modèle étudié par un polynôme de régression encore appelé surface de réponses ou métamodèle [Mara 01b]. Développée sous environnement MATLAB, elle permet l'identification des paramètres les plus influents sur les sorties du modèle ; ce qui facilite l'identification de l'erreur de modélisation provenant d'une mauvaise estimation de paramètres. La méthode a été appliquée à CODYRUN [Mara 00b] pour l'optimisation du modèle d'enveloppe de la cellule LGI.

Les procédures de comparaison mesure/modèle ont été améliorées également grâce à l'analyse temps-fréquence qui permet parfois de différencier les variables corrélées [Abelard 99], [Mara 00] et ont été appliquées avec succès au modèle d'enveloppe de la cellule LGI [Mara 01a]. Le d'enveloppe de la cellule LGI [Mara 01a].

Les supports expérimentaux se sont quant à eux étoffés avec la plate-forme expérimentale de l'IUT, les supports en environnement naturel de la Trinité, La Découverte et l'Entre Deux (voir chapitre 1) et les fichiers de mesure en provenance d'EDF (cellules ETNA) [Boyer 99], [Mara 00a].

| Tests à posteriori                             | Ce qui a été fait dans notre équipe (1994-2001)  |
|--|--|
| Analyse de sensibilité paramétrique de modèles | Application de l'analyse de sensibilité différentielle approchée [Garde, 97]<br>Méthode originale d'analyse de sensibilité basée sur l'analyse de régression [Mara 00a], [Mara 01b]  |
| Comparaison<br>Mesure/modèle                   | <p><b>Supports expérimentaux :</b><br/>           Cellule expérimentale LGI [Garde, 97]<br/>           Maison de l'Hermitage [Mara, 96], [Garde 97]<br/>           La Trinité et La Découverte [Lauret 01b], [Garde 01a], [Garde 01d]<br/>           Entre Deux [Lucas 01b]<br/>           Cellules ETNA [Boyer 99], [Mara 00a]</p> <p><b>Comparaison mesure/modèle :</b><br/>           Recherche de corrélations entrées \ résidu : les outils d'analyse spectrale [Garde 97], [Mara 98]<br/>           Recherche de corrélations entrées \ résidu : la STFT (temps - fréquence) [Abelard 99], [Mara 01a], [Mara 00]</p> |

Tableau 2: Liste des tâches effectués dans l'Equipe Génie Civil Thermique de l'Habitat pour les phases de tests à posteriori appliquées à CODYRUN.

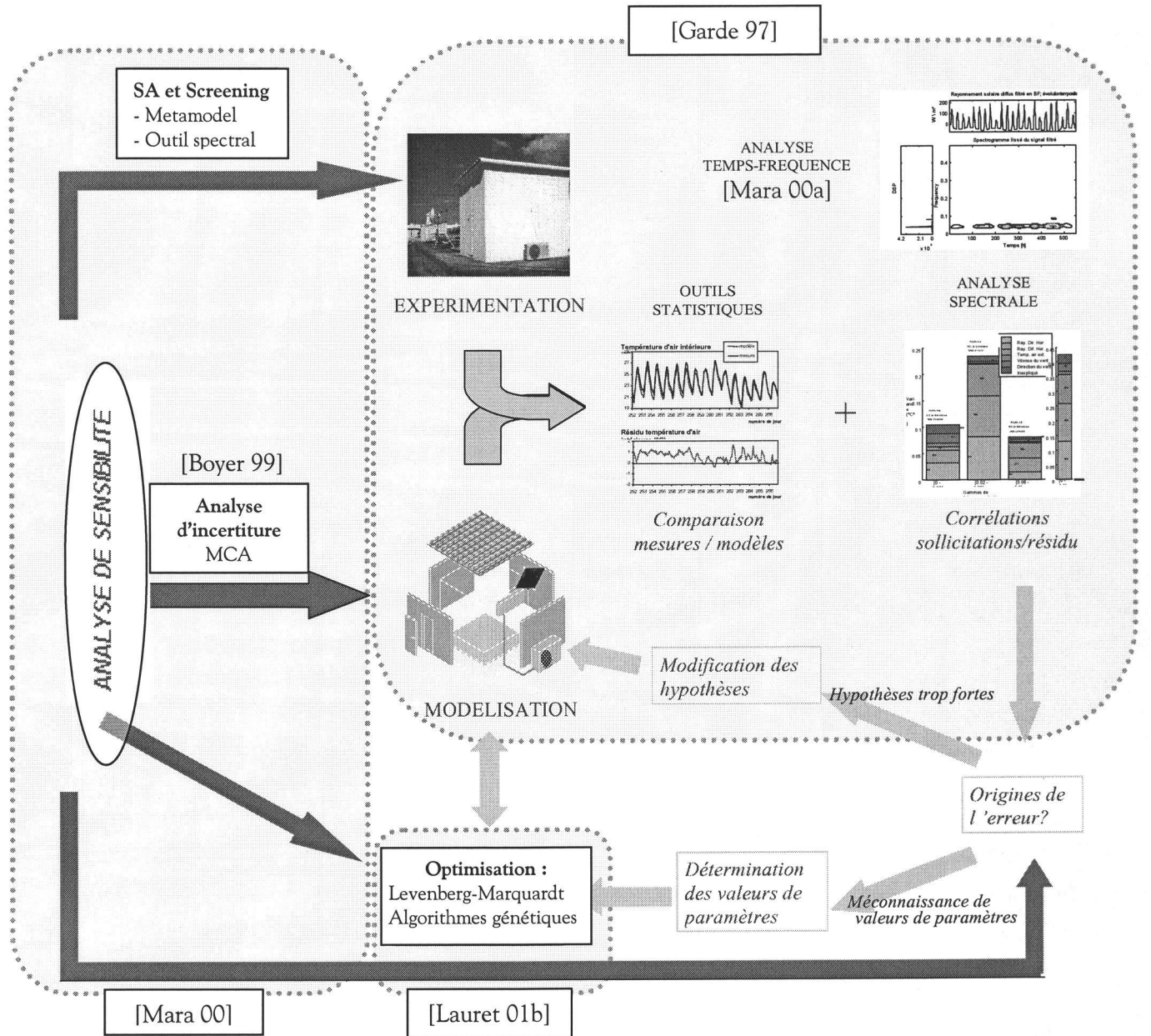


Figure 1 : Méthodologie de la validation expérimentale et travaux effectués

## 2 Le protocole BESTEST

### 2.1 Introduction

L'Agence Internationale de l'Energie a mis en place un groupe de travail, le groupe *Model Evaluation and Improvement*, composé d'experts en thermique du bâtiment, afin de proposer des outils et des données pour la validation globale de logiciels. Leur méthodologie de validation est basée sur :

- la comparaison inter-logiciels;
- la vérification analytique;
- la validation expérimentale.

Le National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) travaillant sur le thème de la comparaison inter-logiciels, a développé une méthode, dénommée BESTEST (pour Building Energy Simulation Test), afin de tester les codes de simulation énergétique du bâtiment [Judkoff 95b], [Judkoff 99]. 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 :

- SERIRES 1.2 (Building Research Establishment, UK) ;
- ESP-RV8 (De Monfort University, UK) ;
- CLIM2000 (Electricité de France, France) ;
- DEROB-LTH (Lund Institute of Technology, Suède) ;
- BLAST 3.0, DOE-2.1D, SERIRES/SUNCODE 5.7 (NREL, USA) ;
- BLAST 3.0 (Politecnico Torino, Italie) ;
- TASE (Tampere University, Finlande) ;
- S3PAS (University of Sevilla, Espagne) ;
- TRNSYS 13.1 (Vrije Univeriteit, Belgique).

## 2.2 Déroulement de la procédure

La procédure consiste à réaliser une série de tests portant sur différents modèles de bâtiments. Chaque étude permet de vérifier l'aptitude du code à représenter un aspect bien particulier du comportement thermique du bâtiment (apport du vitrage, protection solaire des vitrages, prise en compte de la ventilation, etc...). Deux types de bâtiments (*lourds* et *légers*) et deux séries de tests sont proposés : les tests de qualification et de diagnostic. L'ensemble des tests conduit à un total de 38 études comparatives.

Les différents tests suivent une progression bien définie. Si les résultats sont en accord avec les programmes de référence, autrement dit, si les résultats restent compris dans l'intervalle délimité par ces derniers, alors on passe au cas suivant (toujours dans la série de qualifications). Par contre, si le code échoue, cela peut signifier que le logiciel n'est pas en mesure de modéliser le bâtiment considéré.

Afin d'aider les développeurs à déterminer l'origine de l'erreur (lorsqu'il y en a), une série de diagnostics est proposée (à chaque cas de qualification correspond une série de diagnostics). Par exemple, si le logiciel testé n'arrive pas à modéliser un cas de bâtiment alors l'expert doit réaliser les tests dits de diagnostics jusqu'à ce que l'algorithme défaillant soit identifié. Le retour à la série de qualifications n'est conseillé que si l'erreur responsable des écarts observés est corrigée.

## 2.3 Application de BESTEST à CODYRUN

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 [Soubdhan 99], [Mara 00]. Il nous a été ainsi permis de mettre en évidence certaines erreurs, par exemple dans l'algorithme de calcul du coefficient de transmission d'un vitrage (voir Tableau 1)

| Noms des codes<br>(Pays) | ESP<br>(UK) | BLAST<br>(US/IT) | DOE2<br>(USA) | SRES/SUN<br>(USA) | SERIRES<br>(UK) | S3PAS<br>(SPAIN) | TRNSYS<br>(BEL/UK) | TASE<br>(FINLAND) | CODYRUN<br>(LA REUNION) |
|--------------------------|-------------|------------------|---------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|
| CAC (MWh)                | 4.296       | 4.773            | 5.709         | 5.226             | 5.596           | 4.882            | 4.872              | 5.362             | 3.927                   |
| CAF (MWh)                | 6.137       | 6.433            | 7.079         | 7.278             | 7.964           | 6.492            | 6.492              | 6.778             | 4.891                   |

Tableau 3 : Prédictions des différents logiciels des consommations calorifique et frigorifique annuelle.

Manifestement

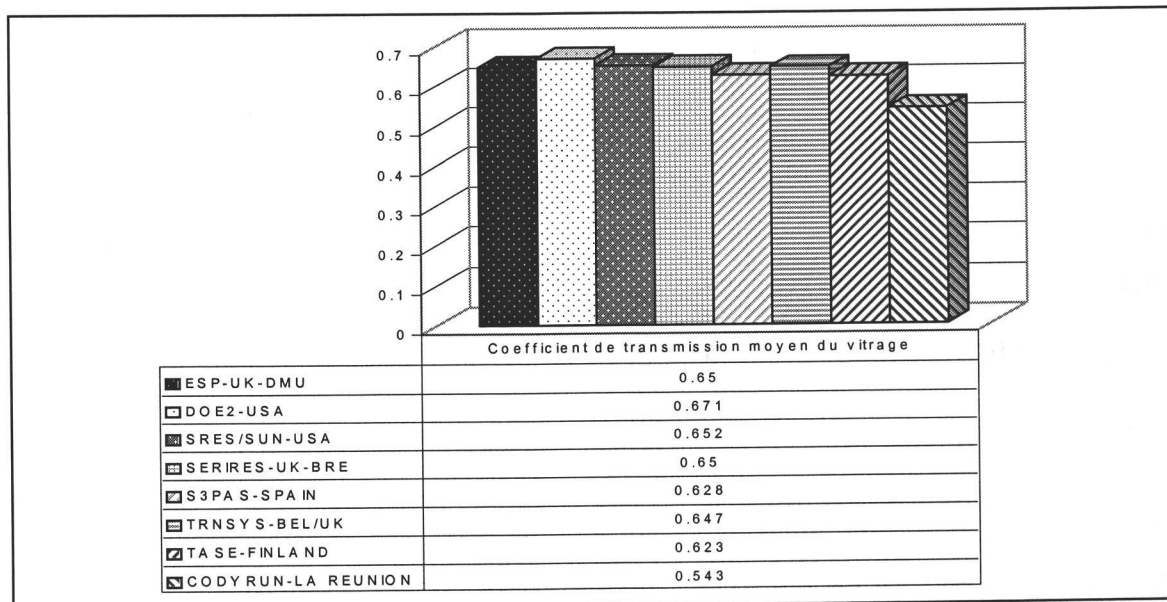


Figure 2 : Coefficient de transmission moyen du vitrage. Codyrun sous estime la valeur du coefficient

Un autre 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.

## 2.4 Perspectives



## 3 L'analyse de sensibilité

### 3.1 Introduction

L'analyse de sensibilité est définie par [Saltelli 99] comme *l'étude de la dépendance de la sortie d'un modèle vis à vis de ces facteurs*. La notion de facteur concerne aussi bien des sous-modules intégrés au modèle, des entrées (facteur évoluant au cours d'une simulation) que les paramètres (facteur restant fixe toute la durée de la simulation).

Dans la suite, ne nous intéressant qu'à l'analyse de sensibilité paramétrique, les expressions *facteur* et *paramètre* seront employées indifféremment.

L'influence d'un facteur sur la sortie (encore appelée réponse) d'un modèle peut être appréhendée qualitativement ou quantitativement. Lorsque seule une information qualitative est recherchée, les méthodes dites de *screening* (criblage) sont utilisées. En effet, ces dernières nécessitent généralement moins de simulations que de facteurs. Pour la recherche d'informations quantitatives, il existe différentes méthodes d'analyse de sensibilité ayant toutes des avantages et des inconvénients [Helton 93]. Nous ne dresserons pas ici une liste exhaustive de ces dernières ; nous nous bornerons à évoquer celles d'entre elles qui ont déjà été appliquées en thermique du bâtiment. Pour une revue détaillée des méthodes, nous conseillons au lecteur la référence : [Saltelli 00]

L'étude de la sensibilité des modèles nous est apparue comme une étape indispensable dans nos travaux de recherche. La méthode employée découle de notre expérience dans l'utilisation des outils d'analyse spectrale des signaux [Garde 97a]. Celle-ci étant nouvelle, nous avons été amenés à considérer l'analogie avec une approche couramment employée dans certaines techniques d'analyse de sensibilité à savoir l'analyse de régression [Mara 00]. Cette comparaison nous a permis de mieux comprendre les impacts de notre approche sur la sortie du modèle et les hypothèses nécessaires à sa bonne réalisation.

Après avoir introduit la méthode que nous utilisons, nous l'appliquerons à un modèle de la cellule LGI, cellule expérimentale décrite dans le chapitre précédent. La cohérence des résultats obtenus nous conforte quant à son efficacité à identifier et quantifier l'influence des paramètres.

### 3.2 Méthodologie

Il existe différentes techniques qui sont regroupées en deux classes : les méthodes locales (ou directes) et les méthodes globales (ou statistiques). Les méthodes locales consistent à estimer les dérivées de la sortie par rapport aux paramètres alors que les méthodes globales s'intéressent à l'évaluation de l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation.

L'expression *analyse de sensibilité* exprime en fait un enchaînement d'étapes successives concernant la relation paramètres \ sorties :

- Le *screening* a pour objectif de déterminer, dans un modèle à  $n$  paramètres, les  $k < n$  plus influents pour un nombre de simulations généralement inférieur au nombre de

paramètres. Généralement, une étude de sensibilité de modèle débute par une phase de *screening*. L'information est qualitative dans ce sens qu'il ne s'agit pas de chiffrer leur influence sur la sortie et, de plus, les interactions (non-linéarités) entre les paramètres ne sont pas considérés. 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 des paramètres tout en tenant compte des effets non linéaires. On s'intéresse par exemple à 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 généralement préférable d'avoir un jeu de paramètres restreints. C'est la raison pour laquelle cette étude 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 un ensemble de valeurs), 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.
- Et enfin l'**optimisation** qui consiste à déterminer les valeurs optimales des paramètres afin de réduire l'écart entre les prédictions et une référence (en général, la mesure). Cette étude est intéressante dès lors que l'on cherche à minimiser l'écart (au sens de moindres carrés) entre les résultats de simulation et ceux de la mesure ou que l'on cherche à déterminer les valeurs optimales des paramètres d'un modèle simplifié par rapport à un modèle plus détaillé.

Il existe différentes techniques d'analyse de sensibilité. Nombre d'entre elles ont été appliquées aux modèles thermiques et aérauliques du bâtiment [Rahni 97] [Aude 97]. La nouvelle méthode que nous introduisons ici a été utilisée non pas par souci d'originalité, mais pour sa simplicité de mise en œuvre.

### 3.3 Description de la méthode proposée

L'idée consiste à réaliser plusieurs simulations en faisant varier les valeurs des paramètres (ou facteurs) dans leur intervalle d'incertitude. Cependant, plutôt que de faire varier leur valeur de manière aléatoire, celle-ci évolue d'une simulation sur l'autre de manière sinusoïdale et à chaque paramètre est associé une *fréquence* différente (cf. figure 1). Il est important de noter que le terme *fréquence* ne se rapporte pas au temps mais au nombre de simulations. Le paramètre est fixe durant toute la simulation (au cours du temps) ce n'est qu'à simulation suivante que sa valeur change en décrivant usinus. Le problème alors posé est celui de la détermination de leur effet sur la (ou les) sortie(s) du modèle. Pour répondre à cette question, nous allons utiliser l'analogie avec l'analyse de régression.

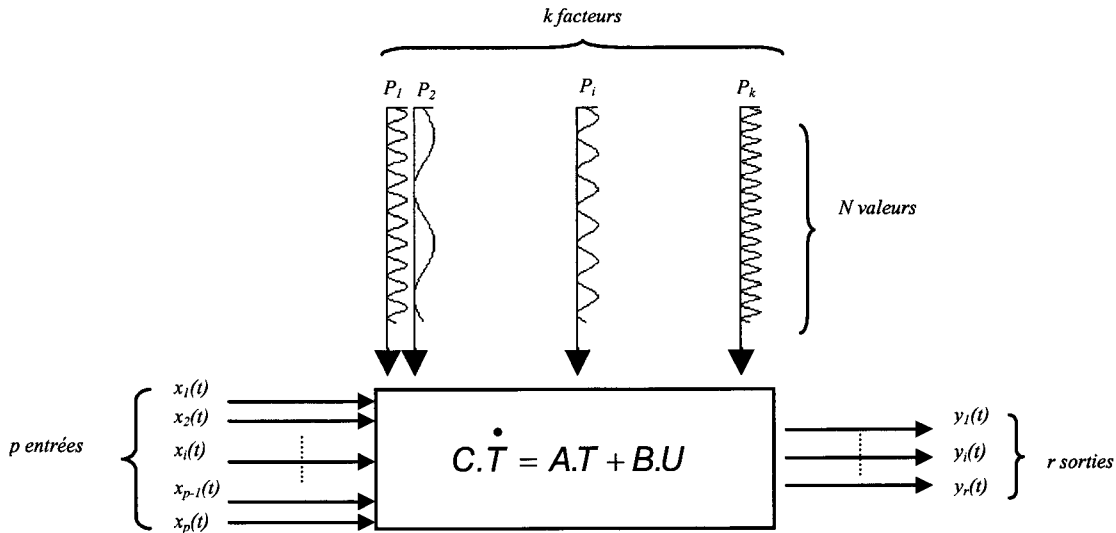


Figure 1 : Description de la méthode.

### 3.4 Analogie 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 1 sont négligées), nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta Y = \sum_{h=1}^k \beta_h x_h + \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \beta_{hh'} x_h x_{h'} + \varepsilon \quad (1)$$

$\Delta Y$  : Vecteur (ou matrice si  $Y$  dépend du temps) contenant les écarts entre les différents résultats de simulation et le résultat de base ( $\beta_0$ )

$x_h$  : facteur  $h$  standardisé

$\beta_h$  : Coefficient représentant l'influence au premier ordre du facteur  $h$

$\beta_{hh'}$  : Coefficient représentant les effets d'interaction entre les facteurs  $h$  et  $h'$  (lorsque  $h=h'$  l'effet est dit quadratique)

$\varepsilon$  : Terme d'erreur du modèle de régression, dans la suite nous supposons que ce coefficient est nul.

L'influence relative d'un facteur sur la sortie est donnée par la valeur absolue de  $\beta_h$ , de même que 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 d'abord, effectuer un ensemble de  $n$  simulations (plans d'expériences) avec des jeux de paramètres différents. Puis, il faut standardiser les valeurs des facteurs en utilisant la relation suivante :

$$x_h = (X_h - b_h) / a_h \quad (2)$$

en posant :  $X_h$  la valeur initiale du paramètre  $h$ ;

$b_h = (u_h + l_h) / 2$  avec  $X_h \in [u_h, l_h]$ ;

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

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

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

La méthode que nous avons introduite implique :  $X_h = X_{base}(1 + \alpha \sin(2\pi f_h))$  qui assure que  $X_h \in [X_{base} - \alpha X_{base} \quad X_{base} + \alpha X_{base}]$ .

L'équation (2) donne :  $x_h = (X_h - b_h)/a_h$

où  $b_h = (u_h + l_h)/2$

$$= (X_{base} + \alpha X_{base} + X_{base} - \alpha X_{base})/2 = X_{base}$$

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

$$= (X_{base} + \alpha X_{base} - X_{base} + \alpha X_{base})/2 = \alpha X_{base}$$

d'où  $x_h = (X_h - b_h)/a_h = (X_h - X_{base})/\alpha X_{base}$

$$= \sin(2\pi f_h) \text{ de sorte que } x_h \in [-1 \ 1].$$

Ainsi, les  $x_h$  sont des sinus normalisés aux fréquences  $f_h$ , ce qui fait que l'équation (1) devient (en posant  $\varepsilon = 0$ ) :

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \sum_{h=1}^k \beta_h \cdot \sin(2\pi f_h) \\ &+ \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \beta_{hh'} \sin(2\pi f_h) \cdot \sin(2\pi f_{h'}) \end{aligned} \quad (3)$$

Par conséquent, l'application de la méthode proposée implique que  $\Delta Y$  soit une superposition de combinaisons de sinus.

### 3.5 Evaluation de l'influence des paramètres

L'influence de chaque paramètre sur la sortie du modèle se retrouve facilement en calculant la transformée de Fourier (TF) ou la densité spectrale de puissance (DSP) des écarts ( $\Delta Y$ ). En effet, la DSP de l'équation (3) donne :

$$\begin{aligned} \Gamma_{\Delta Y}(f) &= \sum_{h=1}^k \frac{\beta_h^2}{4} \cdot \delta(f - f_h) \\ &+ \sum_{h=1}^k \sum_{h'=1}^k \frac{\beta_{hh'}^2}{4} \left[ \frac{1}{4} \delta(f - (f_h - f_{h'})) + \frac{1}{4} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] \quad \forall f \geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

$\delta$  : est la distribution de Dirac.

Par conséquent, si le modèle est linéaire par rapport aux paramètres, le spectre (graphe représentant la DSP) des écarts en sortie (induit par la variation des paramètres) doit faire apparaître différents pics aux fréquences associées aux paramètres les plus influents. L'amplitude d'un pic sera d'autant plus élevée que le paramètre (ou l'interaction) associé sera influent. De même, l'amplitude associée à une fréquence (par ex. :  $f_h$ ) correspond au carré de l'écart entre le modèle de base et le modèle dont seule la valeur du paramètre  $X_h$  est modifiée

de  $\alpha$ . Ce résultat est illustré dans l'article [Lauret 00] traitant de l'application de cette technique sur un bâtiment réel.

Si le modèle n'est pas linéaire vis à vis des paramètres, autrement dit s'il existe des interactions, le spectre doit contenir des pics à des fréquences qui n'ont été attribuées à aucun paramètre. Plus exactement, si le modèle comporte des interactions d'ordre  $p$ , le spectre doit contenir  $2^p$  fréquences supplémentaires qui sont la combinaison linéaire des fréquences des paramètres interagissant. Ainsi, une interaction d'ordre 1 engendre deux fréquences supplémentaires qui sont la somme  $(f_h + f_{h'})$  et la différence  $|f_h - f_{h'}|$  des fréquences associées aux deux paramètres interagissant.

Un autre aspect intéressant est que cette approche permet de mettre en évidence la nature des interactions entre les paramètres et par conséquent la structure du modèle.

### 3.6 Décomposition de la variance

Nous venons de voir que l'un des indices permettant de mesurer l'influence d'un paramètre sur la sortie est l'amplitude de la fréquence qui lui est affectée. Cependant, lorsque la sortie dépend du temps, il faut calculer la DSP des écarts ( $\Delta Y$  étant une matrice) à chaque pas de temps. L'analyse de l'évolution du spectre en fonction du temps n'étant pas aisée, il est possible de déterminer la contribution de chaque paramètre à la variance des écarts à chaque pas de temps. En effet, l'équation (4) peut s'écrire, pour  $\forall f \geq 0$ , par:

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

D'où par intégration, sachant que  $2 \int_0^{+\infty} \Gamma_{\Delta y}(f) df = \sigma_{\Delta y}^2$  variance de  $\Delta Y$  on obtient :

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{h=1}^p \frac{\beta_h^2}{2} + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{\beta_{hh'}}{4} \text{ car } \Gamma_{\Delta Y}(\mathbf{f}) \text{ est pair.}$$

Soit :

$$1 = \sum_{h=1}^p \frac{\beta_h^2}{2\sigma_{\Delta y}^2} + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{\beta_{hh'}}{4\sigma_{\Delta y}^2} \quad (5)$$

L'équation (5) traduit la décomposition de la variance des écarts en sortie en fonction des facteurs et de leurs interactions.

### 3.7 Mise en œuvre pratique

Nous venons de voir que les effets d'interaction entre les paramètres ont pour conséquence d'engendrer des fréquences supplémentaires de même amplitude. Ce dernier résultat amène à quelques commentaires :

- d'abord, pour 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 (il faut que les fréquences choisies soient incommensurables).
- Ensuite, la fréquence  $(f_h + f_{h'})$  peut ne pas respecter la condition de Shannon due à l'échantillonnage (à la fréquence  $f_e$ ) ce qui aurait pour conséquence, l'apparition dans le spectre d'une fréquence égale à  $(f_e/2 - f_h - f_{h'})$  (cf. [5]).

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. Ces conditions étant difficiles à respecter, en pratique, nous choisissons un jeu de fréquences régulièrement espacées de sorte que leur localisation soit aisée sur le spectre. Et lorsqu'une interférence (superposition de fréquences) est suspectée, une nouvelle analyse de sensibilité est réalisée en permutant les fréquences. Si les résultats diffèrent de la précédente étude, alors cela signifie qu'il y a interaction.

## 4 Recherche de corrélations entrées / résidu

Comme nous l'avons précisé précédemment, la comparaison des résultats de la mesure à ceux du modèle est une étape importante de la validation. Cependant, lorsque le modèle n'est pas valide, il est intéressant de rechercher les causes des écarts observés entre la mesure et le modèle (ce afin de l'améliorer). Pour ce faire, une démarche consiste à rechercher des corrélations entre les entrées et le résidu permettant ainsi de mettre en évidence les entrées mal prises en compte par le modèle. Contrairement à l'analyse de sensibilité, cette étude ne nécessite aucune autre simulation et n'est donc pas très coûteuse en temps. Il serait, par conséquent, dommage de ne pas tenir compte de cette information dans le cadre de la recherche de l'origine de l'erreur.

### 4.1 Analyse classique

Les outils classiques de calcul de corrélation entre deux signaux sont les coefficients d'intercorrélation dans le domaine temporel et la fonction de cohérence dans le domaine spectral. Ramdani propose le test de cohérence de Fisher afin d'identifier les entrées corrélées au résidu [Ramdani 97]. A partir des outils de caractérisation dans le domaine spectral, il propose de quantifier la part du résidu expliquée par les différentes excitations du modèle.

En fait, l'efficacité de ces outils est tributaire des corrélations entre les entrées elles-mêmes. Garde montre que l'application sur des signaux réels n'est pas toujours possible [Garde 97a]. Le problème vient du fait que les sollicitations météorologiques sont fréquemment corrélées entre elles (généralement la composante journalière et la première harmonique). Dans ce cas, le recours aux outils temps-fréquence peut permettre de surmonter cette difficulté. En effet, ce type d'outil d'analyse fournit une description bidimensionnelle du signal (espace temps-fréquence). Ainsi, si les entrées possèdent la même signature fréquentielle, elles peuvent cependant posséder une signature temps-fréquence différente [Rabenstein 96].

### 4.2 La transformée de Fourier à court terme

La transformée de Fourier à court terme (STFT) est la décomposition de l'énergie (puissance) d'un signal en temps et en fréquence. Elle consiste à étudier l'évolution fréquentielle d'un signal au travers d'une fenêtre (finie) glissante dans le temps. La position de la fenêtre sur le signal indique approximativement la localisation temporelle du spectre. Ainsi, la STFT d'un signal est donnée par :

$$F_x(f,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u).h^*(u-t).e^{-2j\pi fu}.du$$

$$= \int_{u-T/2}^{u+T/2} x(u).h^*(u-t).e^{-2j\pi fu}.du$$

où  $h^*$  est le conjugué de la fenêtre d'analyse de longueur finie  $T$ .

La représentation temps-fréquence de  $F_x(f,t)$  est appelée spectrogramme. Le problème majeur de la STFT est le choix de la fenêtre notamment la forme et la taille. En effet, le

principe d'incertitude d'*Heisenberg-Gabor* [Auger 97] limite le produit durée temporelle et bande fréquentielle. Par conséquent, l'amélioration de la résolution temporelle ne peut se faire qu'au détriment de la résolution fréquentielle et réciproquement.

### 4.3 Application à des signaux réels

Dans le cadre de la validation expérimentale du modèle d'enveloppe de la cellule LGI (cf. [6]), une campagne de mesure a été réalisée en 1996. Nous présentons les résultats obtenus lors de la comparaison mesure / modèle (cf. figure 2).

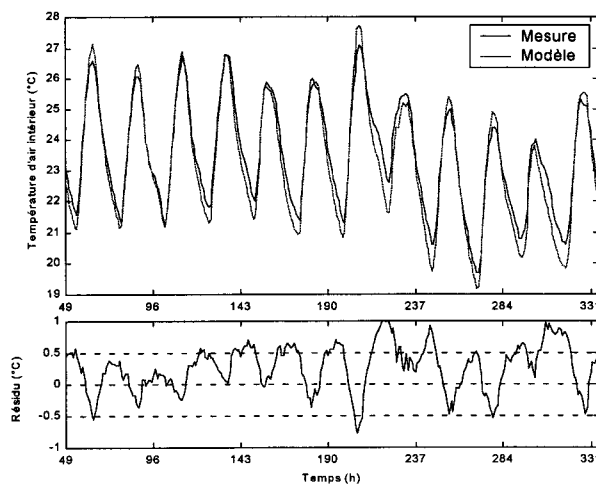


Figure 2: Comparaison mesure / modèle de la cellule LGI

Le modèle est jugé non valide car les écarts observés sont supérieurs aux incertitudes sur la mesure ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Les caractéristiques statistiques du résidu, une fois enlevés les deux premiers jours, sont les suivantes :

|            |          |
|------------|----------|
| Moyenne    | 0.267 °C |
| Ecart type | 0.368 °C |

Afin d'identifier l'origine de l'erreur, nous recherchons les corrélations entre les entrées et le résidu. La DSP du résidu (figure 3) montre que celui-ci contient une forte composante fréquentielle journalière et basse fréquence. Par conséquent, nous nous intéressons aux entrées corrélées au résidu sur ces gammes de fréquences.

Le test de cohérence de Fisher appliqué aux sollicitations météorologiques montre que celles-ci sont fortement corrélées entre elles. En particulier, le rayonnement direct et la température d'air extérieur (cf. figure 4) sont corrélés aux voisinages de  $0.04\text{h}^{-1}$  et  $0.08\text{h}^{-1}$ .



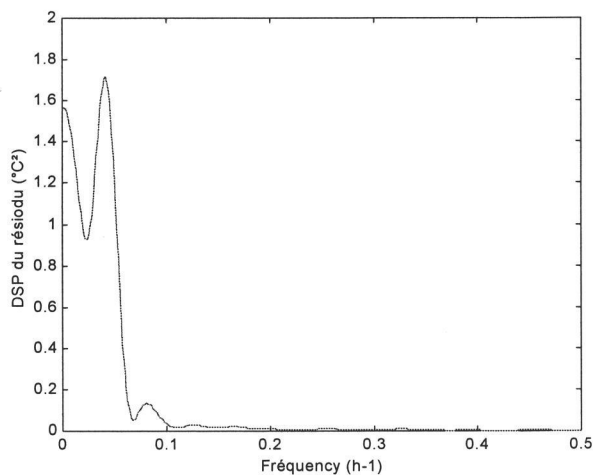


Figure 3: DSP du résidu

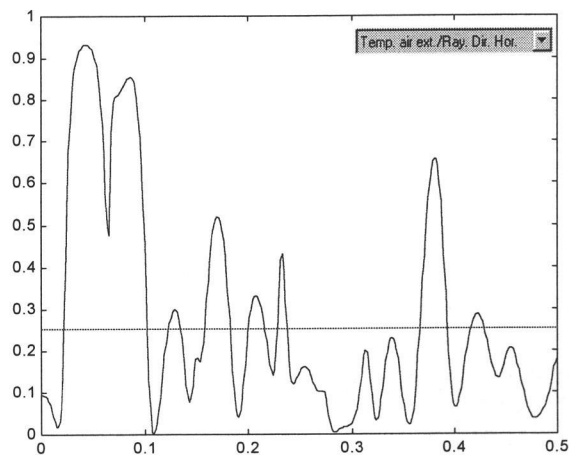


Figure 4 : Corrélation entre la température d'air extérieur et le rayonnement direct.

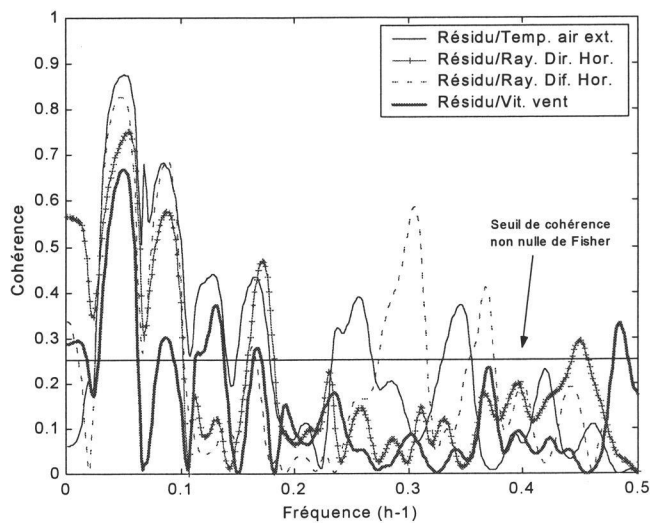


Figure 5 : Corrélations entre le résidu et les entrées.

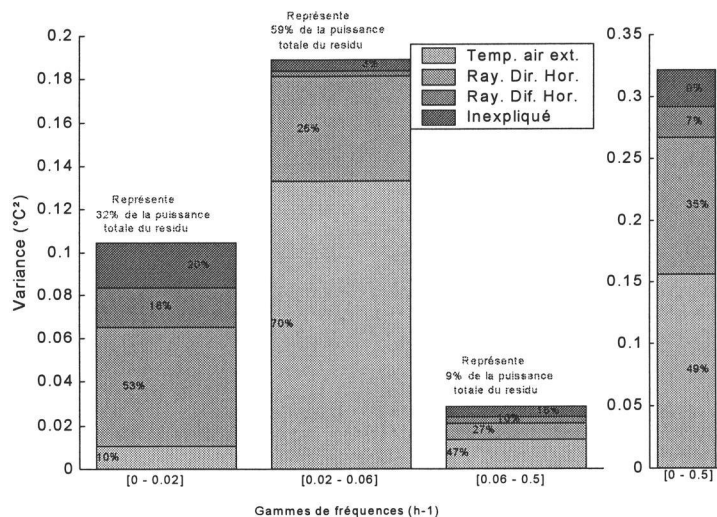


Figure 6 : Décomposition de la variance en prenant comme première entrée la température d'air extérieur.

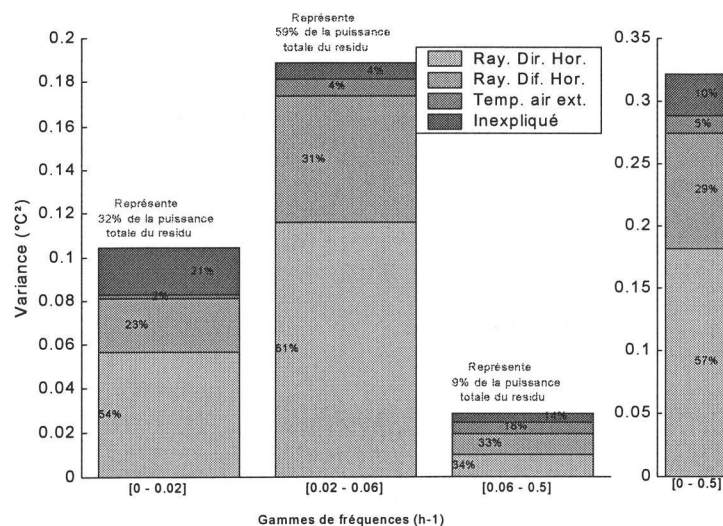


Figure 7 : Décomposition de la variance en prenant comme première entrée le rayonnement direct.

Par conséquent, il sera impossible de savoir exactement laquelle de ces deux entrées est réellement corrélée au résidu sur ces gammes de fréquences. Ce résultat est confirmé par le test de cohérence entre le résidu et les entrées du modèle (cf. figure 5). En fait, d'après cette figure, seul le rayonnement direct semble être corrélé au résidu en basse fréquence.

Les figures 6 et 7 montrent que lorsqu'on décompose la variance du résidu en fonction des entrées du modèle, le résultat dépend de l'ordre des entrées. En effet, il est impossible de connaître l'entrée responsable des écarts pour les variations journalières.

Nous allons vérifier si la signature temps-fréquence du résidu est identique à celle d'une des entrées du modèle. En fait, pour obtenir un spectrogramme exploitable, les signaux doivent être au préalable filtrés en basse fréquence. En ce qui concerne notre étude, cela se justifie d'autant plus que la gamme de fréquence qui nous intéresse est celle qui se situe au voisinage de  $0.04\text{h}^{-1}$ . A l'aide d'un filtre de Butterworth, nous avons enlevé les fréquences inférieures à  $0.02\text{h}^{-1}$  sur tous les signaux. En outre, une entrée sera déclarée corrélée au résidu sur une gamme de fréquence donnée si la signature fréquentielle de celle-ci est similaire à celle du résidu (sur cette même gamme de fréquence) durant toute la durée de mesure.

Une fenêtre de lissage de Hanning et de largeur 49h nous a paru un bon compromis entre la résolution temporelle et fréquentielle. Par conséquent, tous les spectrogrammes ont été calculés avec cette fenêtre avec la boîte à outil développée par Auger [Auger 97].

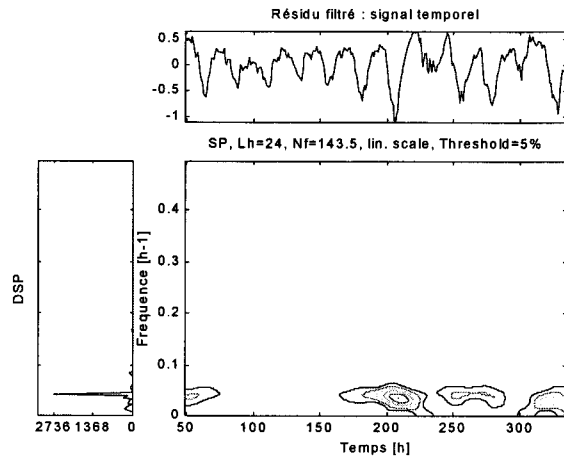


Figure 8 : Spectrogramme du résidu filtré en BF.

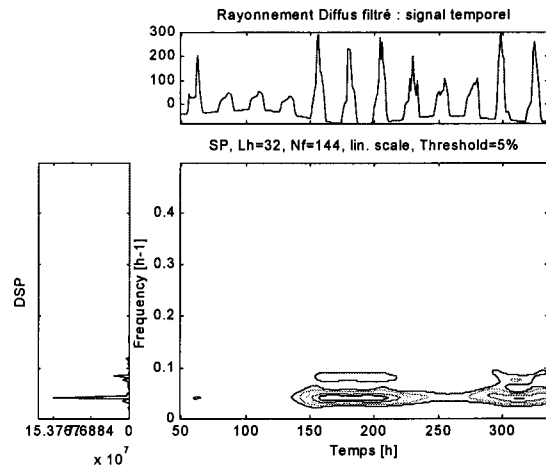


Figure 10 : Spectrogramme du rayonnement diffus reçu sur plan horizontal.

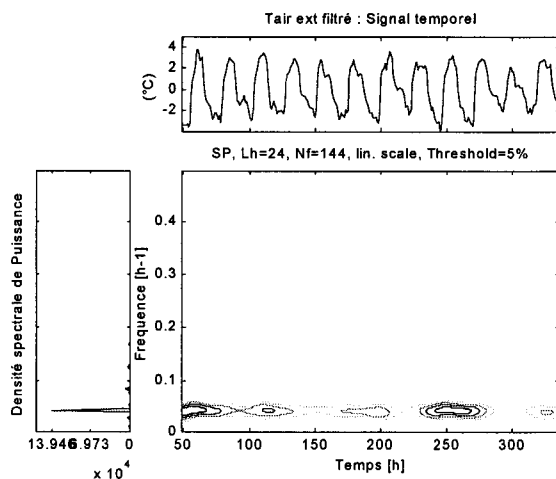


Figure 9 : Spectrogramme de la température d'air extérieur.

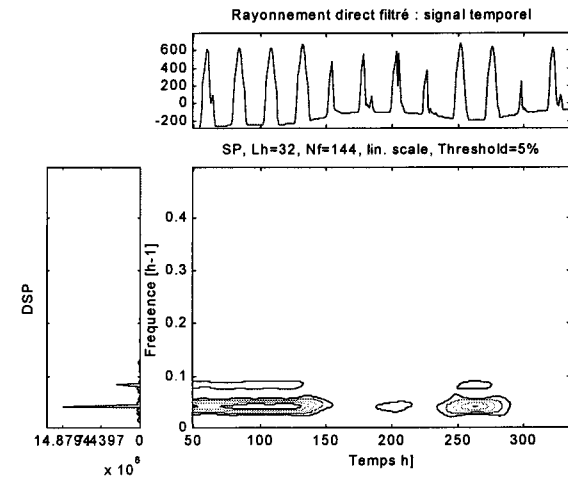


Figure 11 : Spectrogramme du rayonnement direct reçu sur un plan horizontal.

L'analyse du spectrogramme du résidu (filtré et dont on a enlevé les deux premiers jours) montre que ce dernier possède principalement une composante journalière localisée aux voisinages des heures [50, 200, 250 et 325].

Les spectrogrammes des données météorologiques montrent que la signature temps-fréquence de la température d'air extérieur est très différente de celle du rayonnement solaire. Le spectrogramme du rayonnement direct est le complément de celui du rayonnement diffus. Par conséquent, il sera difficile d'identifier exactement laquelle de ces deux entrées est réellement corrélée au résidu. La comparaison des spectrogrammes montre clairement qu'au voisinage de la fréquence journalière, l'entrée corrélée au résidu sur toute la durée de la simulation est la température d'air extérieur.

Nous venons d'identifier les entrées qui sont à l'origine des écarts observés entre le modèle et la mesure. L'étape suivante consiste à déterminer l'origine de l'erreur et c'est un tout autre problème. La corrélation avec la température d'air extérieur pourrait laisser penser que le

problème vient d'une infiltration d'air dans la cellule expérimentale. Cependant, la connaissance de l'expérimentation nous oblige à ne pas retenir cette hypothèse. En fait, le couplage avec l'analyse de sensibilité paramétrique du modèle, nous a amené à identifier la résistance thermique d'un matériau comme étant responsable de l'erreur. L'optimisation de ce paramètre nous a permis de déterminer un modèle optimal (résidu compris dans l'intervalle d'incertitude sur mesure :  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) du modèle de la cellule expérimentale sur cette séquence de mesures (cf. figure 11).

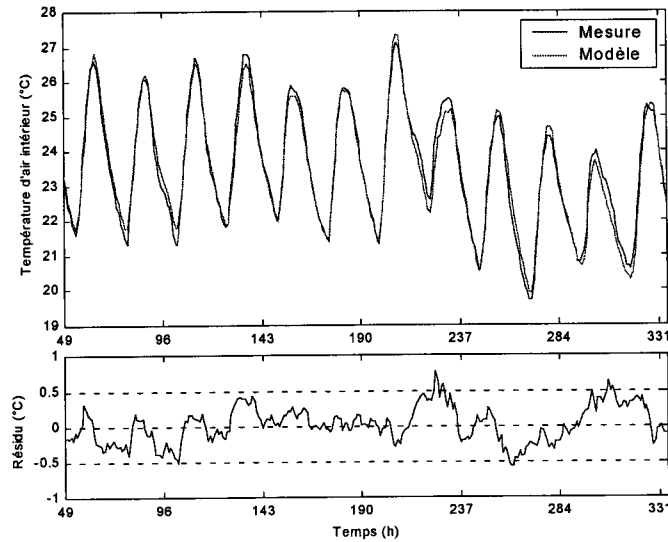


Figure 11 : Comparaison mesure / modèle de la cellule LGI avec le modèle optimisé.

Nous remarquerons que le lien entre le paramètre identifié comme étant à l'origine de l'erreur et l'excitation identifiée comme étant mal prise en compte par le modèle est le transfert de chaleur par conduction.

Nous ne développons pas dans cet article la démarche qui nous a conduit à identifier l'origine de l'erreur et celle qui nous a permis d'optimiser notre modèle. Afin de vérifier que ce dernier a bien été amélioré, nous avons à nouveau confronté les prédictions de ce modèle à une nouvelle série de mesures réalisée cette année [Mara 01a].

## 5 Conclusion et Perspectives

Nous venons de montrer que l'apport des outils d'analyse spectrale dans le cadre de la validation expérimentale est important. Ils peuvent aussi bien aider à réaliser une étude de sensibilité paramétrique de modèle qu'à déterminer les entrées mal prises en compte pour le modèle. Ces informations sont indispensables pour pouvoir améliorer le modèle en évitant ce qu'on appelle le calage.

L'analyse temps-fréquence des signaux étudiés, semble être un bon moyen pour mettre en évidence des corrélations. Cette information est pour l'instant visuelle, mais couplée avec l'analyse spectrale classique, elle permet de mieux quantifier la part d'erreur liée aux entrées. L'intégration de ces outils dans nos travaux nous a permis de déterminer un modèle optimal pour notre cellule expérimentale.

## Chapitre 3

# Développement d'un modèle adimensionné de système de climatisation. Intégration dans un code de simulation thermo-aéraulique.

*Ce chapitre se propose de présenter l'avancement de nos travaux en matière de modélisation des systèmes de traitement d'air.*

*Nous avons développé un modèle adimensionnel permettant de prendre en compte le comportement de split-systèmes en régime permanent et en régime transitoire. Une méthode de couplage du modèle avec un code de simulation en régime dynamique a été proposée.*

*La méthode peut être généralisée à n'importe quel code de simulation capable de calculer les besoins sensibles horaires d'un bâtiment.*

*Il est noter que le texte du chapitre fait l'objet d'une publication soumise à l'ASHRAE dans le cadre d'un symposium organisé par le Technical Committee 4.7 « Energy Calculations » sur le thème : « Recent advances in Energy Simulation » [Garde 01b].*

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Introduction .....</b>   | <b>95</b>  |
| 1.1      | Objet de nos travaux : .....  | 96         |
| <b>2</b> | <b>Développement d'un modèle adimensionné en régime permanent.</b>  | <b>97</b>  |
| 2.1      | Rappel des objectifs .....  | 97         |
| 2.2      | Développement du modèle adimensionné .....  | 98         |
| 2.3      | Synthèse sur le modèle adimensionné en régime permanent .....   | 102        |
| 2.4      | Comparaison du modèle adimensionné par rapport aux données constructeurs :<br>Domaine de validité du modèle .....     | 103        |
| <b>3</b> | <b>Prise en compte du comportement dynamique d'un système dans un<br/>code de simulation.....</b>                     | <b>104</b> |
| 3.1      | Problématique.....  | 104        |
| 3.2      | Rappel bibliographique .....  | 105        |
| 3.3      | Développement du modèle.....  | 111        |
| 3.4      | Intégration du modèle dans un code de simulation.....   | 113        |
| <b>4</b> | <b>Résultats et Discussion .....</b>  | <b>115</b> |
| 4.1      | Comparaison inter-modèle entre le pas de temps de la seconde et le pas de<br>temps de l'heure .....                   | 115        |
| 4.2      | Eléments de validation expérimentale.....   | 116        |
| 4.3      | Influence du dimensionnement du système sur les consommations, le taux de<br>marche et l'efficacité frigorifique..... | 118        |
| 4.4      | Influence des charges latentes sur le rendement d'un système.....   | 119        |
| <b>5</b> | <b>Conclusion .....</b>   | <b>120</b> |

# 1 Introduction

La modélisation du couple enveloppe/système doit permettre d'estimer dès la phase de conception les consommations d'énergie le plus précisément possible, afin d'aboutir à des bâtiments de haute efficacité énergétique. Le couplage enveloppe/système doit également permettre d'évaluer les économies en énergie réalisée par des solutions techniques portant soit sur l'enveloppe (par exemple, l'impact énergétique de la protection solaire de vitrages), soit sur le système. Certes, des outils de simulation sont disponibles et nombreux sur le marché, mais le constat actuel est qu'il existe un décalage important entre les outils utilisés par les concepteurs et ceux utilisés par les physiciens du bâtiment. Ceci est d'autant plus pénalisant que le dimensionnement de l'installation de climatisation est du ressort du bureau d'étude et non du physicien du bâtiment. Holtz constate que la plupart des codes performants issus de la recherche ne sont utilisés que par 10 à 15 % des bureaux d'études et cabinets d'architectures [Holtz 96]. Les problèmes identifiés viennent principalement de la non convivialité des outils développés (pas d'interface graphique), de la difficulté pour le professionnel de s'approprier un outil et de choisir l'outil spécifique à son problème. Le dernier problème vient enfin de la validité des résultats de simulation.

La réflexion a été engagée à ce propos en 1994 dans le cadre d'une proposition d'annexe de l'International Energy Agency (I.E.A.) visant au rapprochement des outils de simulation et à leur application directe dans la conception des bâtiments et de leurs systèmes [IEA 94]. Elle continue actuellement avec la Task 22 de l'I.E.A. dont l'un des objectifs est justement l'amélioration des outils d'analyse énergétique de bâtiments.

A propos de la validité des résultats, les codes de simulation arrivent à prédire correctement les charges thermiques (besoins en chaud et/ou en froid) des bâtiments. Les méthodologies de validation mises en place par les équipes de recherche ont permis d'augmenter considérablement la validité des résultats de simulation. En l'occurrence, le protocole BESTEST [Judkoff 95] devient maintenant la référence en ce qui concerne la comparaison inter-logiciel et permet de corriger les erreurs dues à une mauvaise implémentation numérique. Il est également courant que les équipes réalisent leurs protocoles de validation sur des cellules en environnement naturel [Garde 97], [Meldem 98], [Bauman 83]. La confrontation modèle/mesure utilisant les nouvelles techniques d'analyse de sensibilité et de traitement du signal permettent de réduire considérablement les risques d'erreur du code et d'améliorer la précision des résultats de simulation [Mara 00] [Mara 01a].

Cependant, des efforts restent à accomplir dans la modélisation du couplage d'un système actif à un modèle de bâtiment. De nouveaux problèmes de modélisation viennent alors se greffer : problèmes de régulation dus au type de régulateur, problèmes de dimensionnement de système par rapport aux besoins réels du bâtiment, problèmes de pas de temps car les codes de simulation utilisent généralement le pas de temps de l'heure alors que les constantes de temps des systèmes sont en général de l'ordre de la minute. De ce fait, l'estimation des charges frigorifiques et de la consommation électrique dépendent fortement du régime dynamique de l'appareil. Plus spécifiquement aux systèmes de climatisation (en froid), le problème de la modélisation des transferts d'humidité est bien réel car la régulation des systèmes se fait sur la



température d'air, donc par rapport aux besoins sensibles. Nous savons que le refroidissement d'air s'accompagne systématiquement d'une déshumidification, mais l'humidité n'est pas directement contrôlée, comme l'évoque Khattar [Kattar 84]. L'évolution de l'humidité intérieure est donc soumise à l'évolution des charges latentes du bâtiment, de la puissance disponible sur la batterie froide et de la régulation sur la température d'air.

La figure 1 issue de [ASHRAE 01] illustre bien la problématique du couplage. En effet, on ne peut pas se permettre d'avoir une approche de modélisation de type « top down » où les équations liées au système n'interagissent pas avec celles de l'enveloppe. L'interaction est permanente à tel point que Hens qualifie le bâtiment et les systèmes de traitement d'air associés de frères siamois [Hens 95].

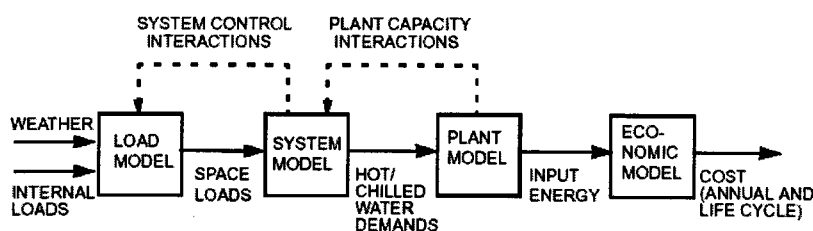


Figure 1: Stratégie globale de modélisation [ASHAE 2001]

## 1.1 Objet de nos travaux :

Nous nous intéressons dans ce papier à la modélisation du couplage enveloppe/système en proposant un modèle adimensionnel permettant de prendre en compte le comportement de systèmes en régime transitoire et en régime permanent. Notre système d'étude concerne les petites unités de climatisation à détente directe plus connues sous le nom de split-système à usage résidentiel et pour des puissances frigorifiques comprises entre 1.7 et 6.8 kW.

L'une des difficultés propre à ce type de système est le manque de données « constructeur » disponibles pour les petites unités de climatisation. Les manufacturiers sont en général réticents à communiquer des données techniques car la concurrence est très rude sur ce type de marché. La tendance actuelle est à celui qui produira le système le plus compact possible avec le meilleur rendement thermodynamique tout en réduisant bien évidemment la consommation. Pour ces raisons, les seules données disponibles sont souvent les performances de l'appareil en régime nominal.

Nous allons présenter dans la section suivante un modèle générique permettant de modéliser le comportement en régime permanent d'un split-système à partir de trois paramètres. Les paramètres retenus sont la puissance frigorifique totale nominale de l'appareil, le facteur de ByPass de la batterie froide et le débit de l'air soufflé au niveau de l'évaporateur.

Le comportement dynamique de l'appareil sera ensuite étudié. La méthodologie utilise les travaux antérieurs de O'Neal et Katipamula [O'Neal 91], [Katipamula 91], [O'Neal 93] et Henderson [Henderson 92], [Henderson 96], [Henderson 00] portant sur l'utilisation du CLF, PLF dans l'estimation du régime dynamique, mais également les travaux de Mara [Mara 00], [Mara 01b] portant sur les nouvelles techniques d'analyse de sensibilité. Nous

présenterons une méthode analytique permettant de calculer le temps de marche et le temps de cycle et ainsi de prédire les puissances fournies au pas de temps de la seconde extrapolées au pas de temps de l'heure. Quatre paramètres caractérisent le système en régime dynamique : il s'agit de la constante de temps  $\tau$  du système, la consigne en température, la zone morte du régulateur  $\Delta T$  et un coefficient  $K$  d'ajustement prenant en compte les aspects transitoires des mouvements d'air.

Nous couplerons enfin le modèle à un code de simulation thermo-aéraulique de bâtiment. Les premiers résultats de simulation et de validation seront présentés dans la dernière partie pour plusieurs systèmes de puissance différente. Ainsi, en connaissant seulement 7 paramètres (3 pour le régime permanent et 4 pour le régime dynamique, nous pourrions connaître pour un pas de temps de l'heure les énergies consommées par le système (totale, sensible, latente et électrique) mais également l'efficacité frigorifique en prenant en compte le comportement dynamique du système.

## 2 Développement d'un modèle adimensionné en régime permanent

### 2.1 Rappel des objectifs

Le développement d'un modèle adimensionné pour la modélisation de petites unités de climatisation poursuit plusieurs objectifs :

Le premier est, comme nous l'avons dit précédemment de s'affranchir du manque de données disponibles dans la bibliographie. Bien sûr, un modèle générique ne pourra pas avoir la précision d'un modèle spécifique à un type de système. Nous nous sommes fixés 10 % de précision en moyenne par rapport à note base de donnée constructeur.

Le second est qu'il est toujours intéressant d'adimensionner le système d'étude car le nombre de paramètres le caractérisant est ainsi réduit.

A l'instar des travaux de Hart portant sur une pompe à chaleur en mode chauffage [Hart 80], le modèle devra par ailleurs tenir compte de la réalité physique liée à la dépendance des puissances frigorifiques et électriques par rapport aux variables intérieures (température et humidité spécifique) et extérieures (température d'air).

En effet, l'exploitation des données « constructeur » montre que la puissance frigorifique sensible d'un split-système diminue lorsque la température extérieure de l'air et l'enthalpie intérieure du local climatisé augmentent. Ces constats ont par ailleurs été confirmés par des mesures [Taldir 96]. De plus, pour une puissance frigorifique constante, le ratio puissance sensible/puissance latente est fonction de l'humidité intérieure du local. Ainsi, lorsque l'humidité est importante, la batterie de l'évaporateur a plutôt tendance à déshumidifier le local, ce qui se traduit (à puissance frigorifique égale) par une puissance latente plus importante, et une puissance sensible plus faible.

## 2.2 Développement du modèle adimensionné

Nous avons déjà proposé dans un précédent papier [Garde 01] un modèle comportemental de split-système mural en régime permanent et dynamique.

Le développement du modèle présenté avait été réalisé à partir d'un tableau de données « constructeur ». Ce tableau donnait, pour une température intérieure d'air sèche fixée à 27°C, l'évolution des puissances frigorifiques totale, sensible et absorbée, pour différentes températures d'entrée d'air au condenseur et différentes températures de bulbe humide.

Les équations de régression du système ont été déterminées et ont permis d'établir un modèle de comportement de la forme suivante :

$$\dot{Q}_{tot} = (c_1 + c_2 \cdot T_{ae}) + (c_3 + c_4 \cdot T_{ae}) \cdot h_{ent} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{sens} = (c_5 + c_6 \cdot T_{ae}) + (c_7 + c_8 \cdot T_{ae}) \cdot h_{ent} + \frac{\dot{V}}{v} c_{pm} (1 - BF) (T_{ae} - 27) \quad (2)$$

$$P_{abs} = c_9 + c_{10} \cdot T_{ae} \quad (3)$$

Les coefficients  $c_1$  à  $c_{10}$  sont les coefficients issus des lois de régression linéaires.

Notre travail a consisté à appliquer la même démarche à partir d'une famille complète de six split-systèmes de puissances frigorifiques comprises entre 1.70 kW et 6.80 kW.

Les données « constructeurs » sont issues d'un même catalogue commercial. Le Tableau 1 donne les caractéristiques (puissance totale, puissance sensible, SHF, puissance électrique absorbée, efficacité frigorifique, débit volumique de l'unité intérieure, facteur de Bypass) de chaque appareil en régime nominal.

| System         | $\dot{Q}_{tot, rated}$<br>(kW) | $\dot{Q}_{sens, rated}$<br>(kW) | SHF  | $P_{abs, rated}$<br>(kW) | $EER_{rated}$ | $\dot{V}$<br>(l.s <sup>-1</sup> ) | BF   |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------|------|--------------------------|---------------|-----------------------------------|------|
| S <sub>1</sub> | 1.70                           | 1.25                            | 0.74 | 0.63                     | 2.70          | 70                                | 0.03 |
| S <sub>2</sub> | 2.10                           | 1.71                            | 0.81 | 0.78                     | 2.69          | 90                                | 0.03 |
| S <sub>3</sub> | 2.80                           | 2.17                            | 0.78 | 1.01                     | 2.77          | 110                               | 0.03 |
| S <sub>4</sub> | 3.30                           | 2.52                            | 0.76 | 1.25                     | 2.64          | 110                               | 0.04 |
| S <sub>5</sub> | 5.10                           | 3.89                            | 0.76 | 1.8                      | 2.83          | 220                               | 0.04 |
| S <sub>6</sub> | 6.80                           | 5.32                            | 0.78 | 2.74                     | 2.48          | 300                               | 0.06 |

Tableau 1 : Caractéristiques en régime nominal des 6 split-systèmes étudiés

Les split-systèmes sont des appareils dont l'unité intérieure est murale, le compresseur est un compresseur hermétique et les échangeurs sont des échangeurs air-air classiques.

Pour chaque système  $S_i$ , nous avons recherché les coefficients de régression  $c_{ji}$  ( $j$  variant de 1 à 10, et  $i$  caractérisant le système considéré), puis nous avons déterminé les coefficients  $c_{ji}^*$  en divisant le coefficient obtenu par la valeur nominale de la grandeur considérée.

Ainsi, nous obtenons les valeurs adimensionnées des puissances frigorifiques totale, sensible et puissance électrique absorbée. Les valeurs moyennées des coefficients pour les six systèmes vont constituer le modèle adimensionné.

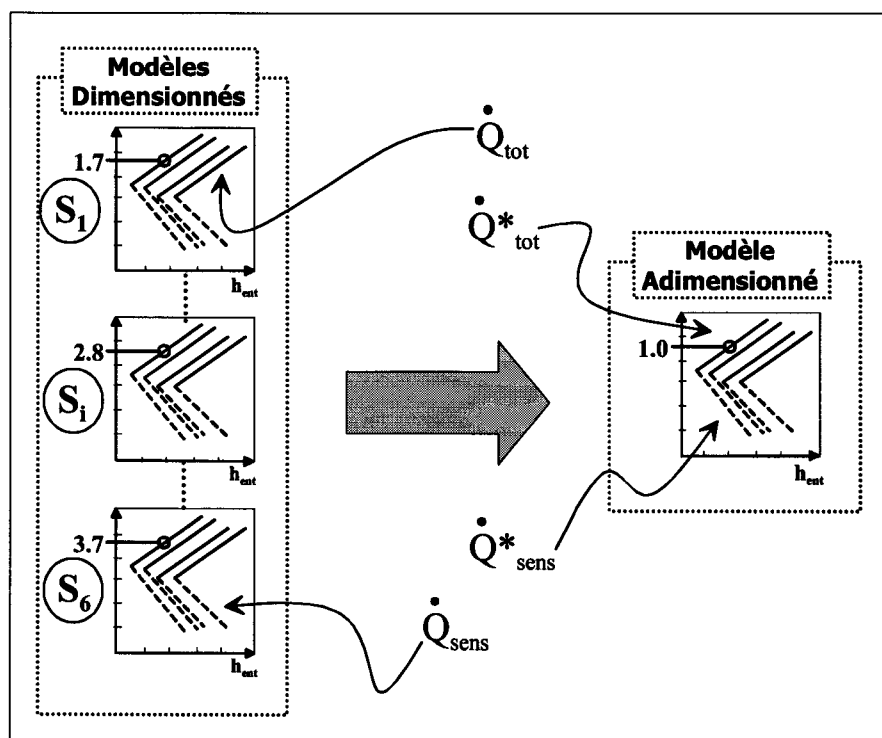


Figure 2 : Description de la démarche pour l'élaboration du modèle adimensionné : Pour chaque système  $S_i$ , les puissances totale et sensible suivent des lois linéaires en fonction de l'enthalpie spécifique de l'air intérieur [Garde 01]. En divisant par les valeurs nominales, on peut se ramener à une évolution adimensionnée des puissances frigorifiques.

Pour chaque système  $S_i$ , on peut donc écrire :

$$\dot{Q}_{tot}^*(S_i) = \frac{\dot{Q}_{tot}(S_i)}{\dot{Q}_{tot,rated}(S_i)} = (c_{1,i}^* + c_{2,i}^* \cdot T_{ae}) + (c_{3,i}^* + c_{4,i}^* \cdot T_{ae}) \cdot h_{ai} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{sens}^*(S_i) = \frac{\dot{Q}_{sens}(S_i)}{\dot{Q}_{sens,rated}(S_i)} = (c_{5,i}^* + c_{6,i}^* \cdot T_{ae}) + (c_{7,i}^* + c_{8,i}^* \cdot T_{ae}) \cdot h_{ai} \quad (5)$$

$$P_{abs}^*(S_i) = \frac{P_{abs}(S_i)}{P_{abs,rated}(S_i)} = c_{9,i}^* + c_{10,i}^* \cdot T_{ae} \quad (6)$$

Les tableaux suivants synthétisent les coefficients de régression obtenus pour tous les systèmes  $S_1$  à  $S_6$ . La moyenne des coefficients  $c_{1,i}^*$  à  $c_{10,i}^*$  permet de déduire les valeurs du modèle adimensionné.

| $\dot{Q}_{tot}$      | $\dot{Q}_{tot, rated}$ | $c_{1,i}$ | $c_{2,i}$ | $c_{3,i}$ | $c_{4,i}$ | $\dot{Q}_{tot}^*$     | $c_{1,i}^*$ | $c_{2,i}^*$ | $c_{3,i}^*$ | $c_{4,i}^*$ |
|----------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S1                   | 1.70                   | 2.27080   | -0.04251  | 0.00229   | 0.00050   | S1                    | 1.33576     | -0.02501    | 0.00135     | 0.00029     |
| S2                   | 2.10                   | 2.26350   | -0.02955  | 0.00630   | 0.00025   | S2                    | 1.07786     | -0.01407    | 0.00300     | 0.00012     |
| S3                   | 2.80                   | 3.11270   | -0.04673  | 0.00844   | 0.00039   | S3                    | 1.11168     | -0.01669    | 0.00301     | 0.00014     |
| S4                   | 3.30                   | 4.13550   | -0.07830  | 0.00360   | 0.00090   | S4                    | 1.25320     | -0.02373    | 0.00109     | 0.00027     |
| S5                   | 5.10                   | 5.22510   | -0.03277  | 0.01028   | 0.00022   | S5                    | 1.02453     | -0.00643    | 0.00202     | 0.00004     |
| S6                   | 6.80                   | 5.62403   | -0.08628  | 0.06940   | 0.00007   | S6                    | 0.82706     | -0.01269    | 0.01021     | 0.00001     |
| $\dot{Q}_{tot, moy}$ |                        | 3.77194   | -0.05269  | 0.01672   | 0.00039   | $\dot{Q}_{tot, ss}^*$ | 1.10502     | -0.0164     | 0.00345     | 0.00015     |

Tableau 2 : Valeurs des coefficients de régression  $c_{1,i}$  à  $c_{4,i}$  pour la puissance frigorifique totale et des coefficients adimensionnés  $c_{1,i}^*$  à  $c_{4,i}^*$  pour la puissance totale adimensionnée  $\dot{Q}_{tot, moy}^*$

| $\dot{Q}_{sens}$      | $\dot{Q}_{sens, rated}$ | $c_{5,i}$ | $c_{6,i}$ | $c_{7,i}$ | $c_{8,i}$ | $\dot{Q}_{sens}^*$     | $c_{5,i}^*$ | $c_{6,i}^*$ | $c_{7,i}^*$ | $c_{8,i}^*$ |
|-----------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S1                    | 1.25                    | 3.76000   | -0.03546  | -0.04081  | 0.00052   | S1                     | 3.00800     | -0.02837    | -0.03265    | 0.00041     |
| S2                    | 1.71                    | 5.06570   | -0.04659  | -0.05594  | 0.00071   | S2                     | 2.96240     | -0.02725    | -0.03270    | 0.00041     |
| S3                    | 2.17                    | 6.58100   | -0.06215  | -0.07178  | 0.00090   | S3                     | 3.03270     | -0.02864    | -0.03308    | 0.00042     |
| S4                    | 2.52                    | 7.35370   | -0.06050  | -0.08100  | 0.00090   | S4                     | 2.91800     | -0.02400    | -0.03214    | 0.00036     |
| S5                    | 3.89                    | 10.17840  | -0.02954  | -0.10669  | 0.00040   | S5                     | 2.61656     | -0.00759    | -0.02743    | 0.00010     |
| S6                    | 5.32                    | 15.32010  | -0.15211  | -0.15371  | 0.00197   | S6                     | 2.87972     | -0.02859    | -0.02889    | 0.00037     |
| $\dot{Q}_{sens, moy}$ |                         | 8.04315   | -0.06439  | -0.08499  | 0.00090   | $\dot{Q}_{sens, ss}^*$ | 2.90290     | -0.02407    | -0.03115    | 0.00035     |

Tableau 3 : Valeurs des coefficients de régression  $c_{5,i}$  à  $c_{8,i}$  pour la puissance frigorifique sensible et des coefficients adimensionnés  $c_{5,i}^*$  à  $c_{8,i}^*$  pour la puissance sensible adimensionnée  $\dot{Q}_{sens, moy}^*$

| $P_{abs}$      | $P_{abs, nom}$ | $c_9$   | $c_{10}$ | $P_{abs}^*$     | $c_9^*$ | $c_{10}^*$ |
|----------------|----------------|---------|----------|-----------------|---------|------------|
| S1             | 0.63           | 0.28149 | 0.01000  | S1              | 0.44680 | 0.01588    |
| S2             | 0.78           | 0.19221 | 0.01700  | S2              | 0.24642 | 0.02179    |
| S3             | 1.01           | 0.36846 | 0.01791  | S3              | 0.36481 | 0.01773    |
| S4             | 1.25           | 0.61230 | 0.01850  | S4              | 0.48984 | 0.01480    |
| S5             | 1.8            | 0.74197 | 0.03063  | S5              | 0.41221 | 0.01702    |
| S6             | 2.74           | 1.73190 | 0.02949  | S6              | 0.63208 | 0.01076    |
| $P_{abs, moy}$ |                | 0.65472 | 0.02059  | $P_{abs, ss}^*$ | 0.43203 | 0.01633    |

Tableau 4 : Valeurs des coefficients de régression  $c_{9,i}$  et  $c_{10,i}$  pour la puissance électrique absorbée et des coefficients adimensionnés  $c_{9,i}^*$  et  $c_{10,i}^*$  pour la puissance électrique adimensionnée  $P_{abs, moy}^*$

D'après les tableaux 2, 3 et 4, le modèle permettant d'obtenir les puissances totale, sensible et absorbée adimensionnées est:

$$\dot{Q}_{tot, ss}^* = (1.1050152 - 0.016435.T_{ae}) + (0.0034454 + 0.0001464.T_{ae}).h_{ai} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{sens, ss}^* = (2.90290 - 0.02407.T_{ae}) + (-0.03115 + 0.00035.T_{ae}).h_{ai} \quad (8)$$

$$P_{abs, ss}^* = 0.43203 + 0.01633.T_{ae} \quad (9)$$

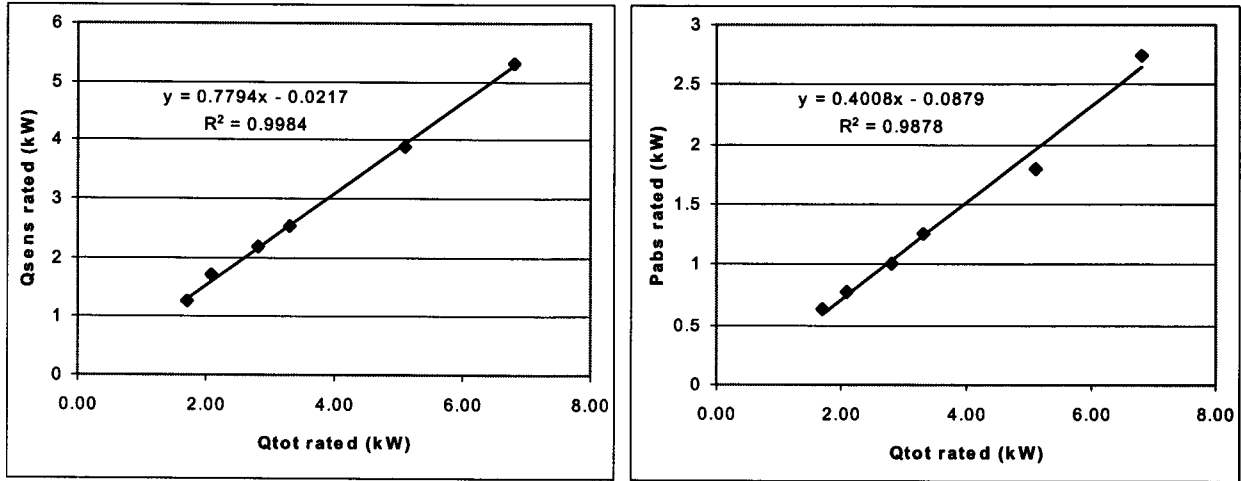


Figure 3 : Evolution des puissances sensible et absorbée en fonction de  $\dot{Q}_{tot,rated}$  : la dépendance linéaire observée permet d'obtenir facilement  $\dot{Q}_{sens,rated}$  et  $P_{abs,rated}$  en fonction de  $\dot{Q}_{tot,rated}$

Par ailleurs, si nous traçons les puissances sensible et absorbée nominales en fonction de la puissance frigorifique totale nominale du tableau 1, nous pouvons constater que des lois linéaires apparaissent.

Il est donc facile, en connaissant uniquement  $\dot{Q}_{tot,rated}$  d'en déduire à l'aide des relations linéaires  $\dot{Q}_{sens,rated}$  et  $P_{abs,rated}$ . D'après la Figure 3, les équations linéaires sont :

$$\dot{Q}_{sens,rated} = 0.7794 \cdot \dot{Q}_{tot,rated} - 0.0217 \quad (10)$$

$$P_{abs,rated} = 0.4008 \cdot \dot{Q}_{tot,rated} - 0.0879 \quad (11)$$

Pour un système quelconque dont on connaît la puissance frigorifique en régime nominal, le modèle adimensionné permettra de déterminer les puissances totales, sensible et absorbée en fonction des conditions intérieures et extérieures. Nous aurons donc :

$$\dot{Q}_{tot,ss} = \dot{Q}_{tot,ss}^* \cdot \dot{Q}_{tot,rated} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{sens,ss} = \dot{Q}_{sens,ss}^* \cdot \dot{Q}_{sens,rated} + \frac{\dot{V}}{v} c_{pm} (1-BF) (T_{ai} - 27) \quad (13)$$

$$P_{abs,ss} = P_{abs,ss}^* \cdot P_{abs,rated} \quad (14)$$

Le terme  $\frac{\dot{V}}{v} c_{pm} (1-BF) (T_{ai} - 27)$  représente la correction sur la puissance sensible qui permet de déterminer les valeurs de puissance sensible pour des températures d'air intérieures autre que 27°C. Rappelons que les données 'constructeur' ont été établies pour des températures d'air extérieur et température de bulbe humide variables mais pour une température d'air fixée à 27°C.

La correction apportée, qui dépend du facteur de ByPass de la batterie (supposé constant dans notre approche) et du débit volumique de l'unité intérieure permet de tenir compte de la réalité physique du fonctionnement d'une batterie froide : celle-ci a plutôt tendance à refroidir lorsque la température d'air est élevée, et à déshumidifier lorsque la température est faible. La correction est basée sur l'approche apparatus dew point (ADP) /bypass factor (BF) expliquée dans [Garde 01] et dont les principes de bases sont définis dans [Carrier 60],[Hirsch 82] ou plus récemment par Henderson [Henderson 92]. Ainsi, lorsque la température d'air intérieure  $T_{ai}$  est supérieure à  $27^{\circ}\text{C}$ , à puissance totale égale, la batterie va avoir tendance à refroidir d'avantage et à moins déshumidifier. A contrario, si  $T_{ai}$  est inférieure à  $27^{\circ}\text{C}$ , la puissance sensible  $\dot{Q}_{sens}$  est moins importante et la puissance latente  $\dot{Q}_{lat}$  de la batterie augmente, toujours pour  $\dot{Q}_{tot}$  constante.

### 2.3 Synthèse sur le modèle adimensionné en régime permanent

La procédure de calcul pour le modèle adimensionné représentées par la Figure 4 est la suivante :

1. Le système est défini par trois paramètres : la puissance totale en régime nominal, le facteur de ByPass et le débit de la batterie froide de l'évaporateur;
2. Les équations (10) et (11) permettent de calculer la puissance sensible en régime nominal et la puissance absorbée correspondantes en régime nominal;
3. Les équations (7), (8) et (9) donnent les puissances totale, sensible et absorbée adimensionnées en fonction des conditions intérieures ( $T_{ai}$  et  $w_i$ ) et extérieures ( $T_{ae}$ );
4. Les équations (12) (13) et (14) permettent de calculer les sorties du modèle (puissance totale, puissance sensible et puissance absorbée) qui seront couplées au régime dynamique que nous allons présenter dans la section suivante. Les puissances seront injectées ensuite dans un code de simulation thermique de bâtiment ;
5. On peut également déterminer à partir des équations l'efficacité frigorifique et la puissance latente.

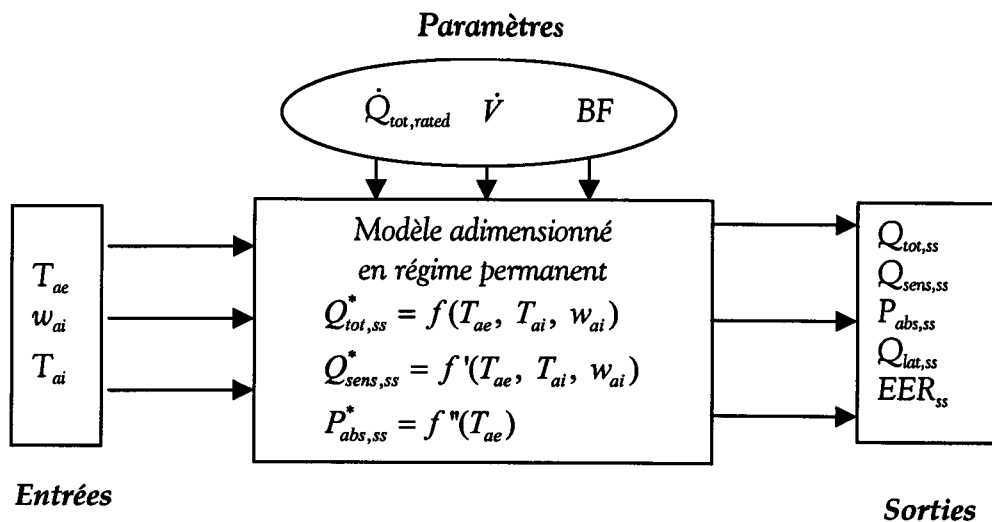


Figure 4 : Paramètres, entrées et sorties du modèle adimensionné

## 2.4 Comparaison du modèle adimensionné par rapport aux données constructeurs : Domaine de validité du modèle

Une fois le modèle adimensionné élaboré, les résultats des sorties du modèle ont été comparés aux valeurs des tableaux de données « constructeurs ». Nous avons calculé les erreurs relatives moyennes et maximales sur les puissances totale, sensible et latente pour les six systèmes ayant servi à élaborer le modèle.

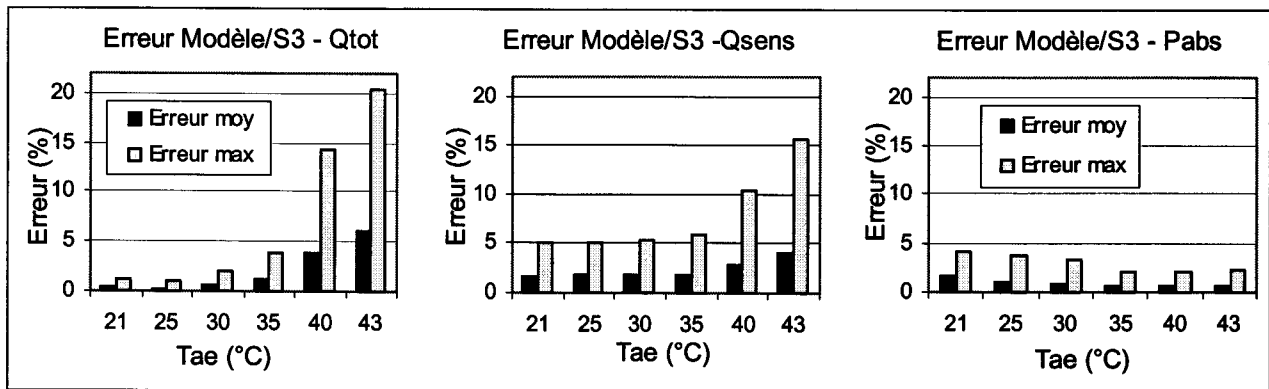


Figure 5 : Comparaison du modèle adimensionné en régime permanent avec le système 3 pour les puissances frigorifiques totale, sensible et absorbée

A titre d'exemple, la figure 4 illustre les comparaisons par rapport au système S3. Nous voyons que l'erreur moyenne reste en dessous de 2% pour des températures extérieures comprises entre 21°C et 35°C. Les erreurs maximales restent en dessous de 5%. Par contre, le modèle est moins précis lorsque la température extérieure est supérieure à 35°C. L'erreur maximale peut alors atteindre 20 %.

D'une manière générale, les erreurs relevées en comparant le modèle à notre base de données « constructeur » montrent que l'erreur moyenne reste inférieure à 4% et que le modèle est valide pour des conditions intérieures (en température et humidité) quelconques mais pour des températures extérieures inférieures à 35°C.



### 3 Prise en compte du comportement dynamique d'un système dans un code de simulation

#### 3.1 Problématique

La problématique que nous exposons dans cette section concerne le couplage d'un modèle de système dans un code de simulation en tenant compte de son comportement en régime dynamique. Le couplage des modèles liés au fonctionnement du ou des systèmes considérés avec les équations des variables liées aux bâtiments intervient dans les équations d'évolution du nœud d'air et de l'humidité spécifique (si l'on souhaite étudier les problèmes dus aux transferts d'humidité et si le code de simulation considéré possède un modèle hydrique).

Les équations à résoudre à chaque pas de temps pour un bâtiment sont en général les suivantes :

$$C_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = \underbrace{\sum_{j=1}^{N_w} h_{ci} \cdot S_i (T_{ai} - T_{si}(t)) + \dot{m} \cdot c_{as} (T_{ae} - T_{ai}) + CI_{sens}}_{Besoins_{sens}} - \dot{Q}_{sens} \quad (15)$$

$$C_w \frac{dw_{ai}}{dt} = \underbrace{\dot{m}_{out} l_v w_{out} - \dot{m}_{in} l_v w_{in} + CI_{lat}}_{Besoins_{Lat}} - \dot{Q}_{lat} \quad (16)$$

avec

$$C_{ai} = \rho_{as} \cdot c_{ai} \cdot V_{ai}$$

$$C_w = \rho_{as} \cdot V_{ai} \cdot l_v$$

Les trois premiers termes de l'équation (15) liée au nœud d'air correspondent respectivement aux échanges par convection entre le nœud d'air et les surfaces intérieures, aux apports sensibles dus aux transferts d'air entre l'intérieur et l'extérieur et aux apports des charges sensibles (occupants, éclairage etc.). Le dernier terme  $\dot{Q}_{sens}$  correspond à la puissance sensible fournie par le système de traitement d'air.

Les termes liés à l'évolution de l'humidité sont les échanges d'humidité (contenue dans l'air) entre la zone i et l'extérieur, les charges latentes (occupants) et la puissance latente  $\dot{Q}_{lat}$  fournie par le système de traitement d'air.

Les hypothèses classiques pour ce genre d'équation sont l'homogénéité de la température d'air et des températures de surface de chaque paroi.

Deux approches peuvent être alors considérées :

- On cherche à déterminer les besoins (sensibles  $Besoins_{sens}$  et/ou en latent  $Besoins_{Lat}$ ) afin de maintenir une consigne en température et en humidité (cas d'un système idéal). A ce

moment là, les inconnues sont  $\dot{Q}_{sens}$  et/ou  $\dot{Q}_{lat}$ . L'inconvénient de cette démarche est que nous ne pouvons disposer des puissances réellement fournies par le système considéré. En effet, le comportement dynamique du système n'est pas pris en compte et la résolution des charges sensibles et latentes doit s'effectuer de manière couplée car la régulation du système se fait uniquement sur la température d'air [Khattar 84]. En outre, elle possède l'avantage d'être applicable à des pas de temps horaire;

- Ou bien, les puissances fournies par le système sont disponibles et on s'intéresse à l'évolution de la température et de l'humidité dans la pièce. Ce cas de figure, nécessite cependant des pas de temps réduits (de l'ordre de la seconde voire de la minute) afin de tenir compte de la mise en régime du système et de ces multiples marche/arrêt au cours du temps.

De nombreux papiers ont en outre déjà exposé l'importance du cyclage de l'appareil sur ses performances [Parken 77], [Goldsmith 80], [O'Neal 91]. Pour tenir compte du couplage thermique/hydrique, la deuxième approche (pas de temps réduit) permet de mieux prendre en compte l'évolution de la température d'air et de l'humidité car les termes dérivés ne sont plus nuls. Par ailleurs, la régulation du système et la mise en régime des puissances échangée lors du déclenchement peuvent être prises en compte. Par contre, une telle approche nécessite des temps de calcul plus long et une meilleure modélisation des phénomènes convectifs en régime transitoire [Beausoleil 01].

Cette section propose une démarche permettant le calcul des performances du système au pas de temps horaire tout en gardant une bonne précision en comparaison à une simulation au pas de temps réduit. Après avoir rappelé les grandeurs intervenant dans la modélisation des systèmes en régime dynamique, nous explicitons la démarche permettant le calcul des puissances mises en jeu par le système et des coefficients de performances. Ensuite, nous donnons quelques éléments de validation de la nouvelle approche. En particulier, nous comparons les résultats obtenus au pas de temps horaire et de la seconde sur un bâtiment donné. Une première confrontation expérimentale est également présentée.

## 3.2 Rappel bibliographique

### 3.2.1 Les paramètres intervenant dans le régime dynamique : wmvjhgfmcxnmwlnx

La prise en compte du régime dynamique d'un système nécessite de faire un rappel préalable des paramètres, grandeurs physiques et hypothèses dont nous avons besoin pour ce type de modélisation.

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que la puissance frigorifique instantanée fournie par le système lors d'un déclenchement du compresseur peut être modélisée par exponentielle du premier ordre à une constante de temps  $\tau$  [O'Neal 91], [Goldschmidt 80], [Henderson 96].

Son expression est donc, à chaque instant  $t$  :

$$\dot{Q}_{cyc} = \dot{Q}_{ss}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (17)$$

D'autres auteurs tels que Mulroy et Didion proposent des modèles à deux constantes de temps (une rapide pour tenir compte de la mise en circulation du fluide frigorigène dans le circuit et une plus lente qui tient compte de l'inertie thermique de la batterie froide) [Muroy 85]. Le modèle à une constante de temps est le plus généralement utilisé car il s'agit d'après O'Neal d'un modèle suffisamment précis pour bien prendre en compte les performances d'un système soumis à des cycles marche/arrêt importants [O'Neal 93]. La constante de temps utilisée est celle qui tient compte de l'inertie thermique de la batterie froide. Elle est en général déterminée par la mesure de la puissance sensible du système [Goldsmith 80], [Hart 80], [O'Neal 93] [Lucas 97]. Cette constante s'applique dans une première hypothèse à la fois sur les puissances totale, sensible et latente. De ce fait, on a :

$$\dot{Q}_{tot,cyc} = \dot{Q}_{tot,ss} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{sens,cyc} = \dot{Q}_{sens,ss} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{lat,cyc} = \dot{Q}_{lat,ss} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (20)$$

Les valeurs en régime permanent sont en général données par un modèle comportemental fonction des conditions intérieures et extérieures [Hart 80]. Dans notre cas, il s'agit du modèle adimensionné présenté dans la section précédente.

Concernant la puissance électrique absorbée, les auteurs s'accordent à dire qu'il n'y a pas de constante de temps sur  $P_{abs}$  et que sa valeur en régime dynamique est égale à sa valeur en régime permanent [Goldsmith 80], [Henderson 96], [O'Neal 91]. Cette hypothèse a été confirmée par de nombreuses expérimentations [Rasmussen 87], [Miller 85] [Garde 97].

Le régulateur pour le type de système étudié est le plus souvent caractérisé par une zone morte qui est souvent de l'ordre de  $1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  par rapport à la température de consigne  $T_c$ ). Une mesure en chambre climatique permet de déterminer précisément la valeur de la zone morte.

La Figure 6 permet de bien synthétiser les paramètres liés au système en régime dynamique ( $\tau$  et  $\Delta T_c$ ), l'évolution des puissances du système en fonction de la température d'air dans la pièce à climatiser.

Le système marche pendant la durée  $t_0$ . La durée d'un cycle est égale à  $t_{cyc}$ . On définit également le taux de marche  $F_n$ , avec  $F_n = t_0/t_{cyc}$  et le nombre de cycles  $C_r$  avec  $C_r = 1/t_{cyc}$ .

Ainsi, avec un tel type de modèle, on peut connaître les valeurs des puissances mises en jeu à chaque pas de temps et pour  $t \in [0, t_0]$ . Les valeurs de  $\dot{Q}_{sens,cyc}$  et  $\dot{Q}_{lat,cyc}$  obtenues avec les équations (19) et (20) sont injectées dans les équations (15) et (16). La résolution des équations différentielles donne l'évolution de la température d'air et de l'humidité.

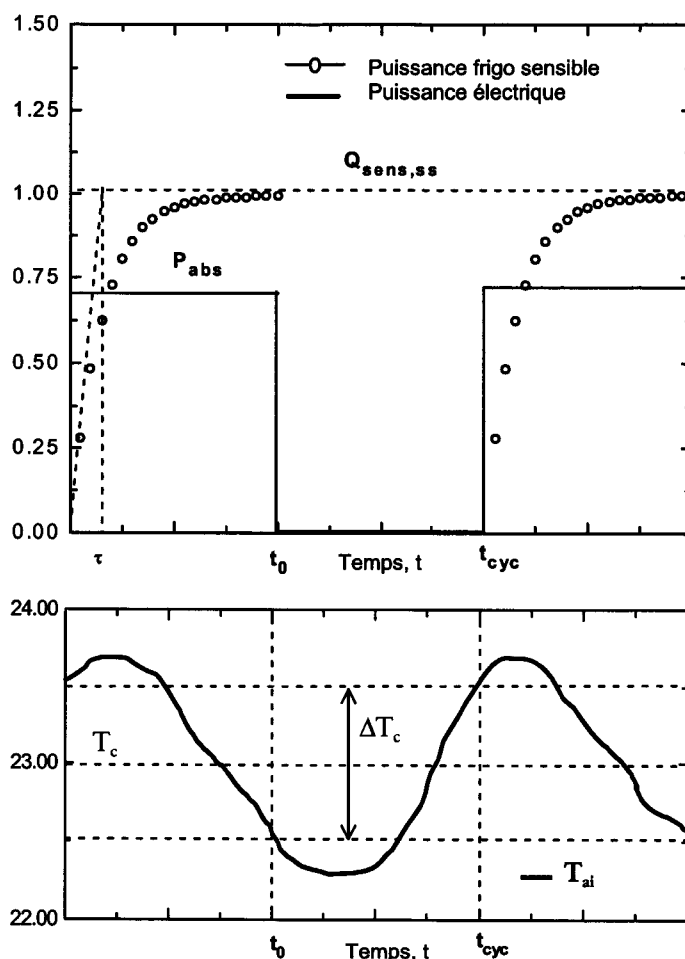


Figure 6 : Modélisation de la puissance frigorifique sensible avec une constante de temps et de la puissance électrique absorbée : la régulation du système dépend de la température de consigne  $T_c$  et de la zone morte du régulateur  $\Delta T_c$ .

### 3.2.2 Le problème de l'étude des régimes transitoires à pas de temps réduit : nécessité d'un coefficient multiplicateur sur la capacité de l'air :

La modélisation des régimes transitoires à pas de temps réduit est toutefois soumise à des erreurs portant sur la rapidité de la convergence de la température d'air. Ce phénomène, caractéristique des régimes transitoires, a déjà été étudié par Lebrun [Lebrun 78] et Brau [Brau 80] et plus récemment par Garde [Garde 97] et Beausoleil-Morrison [Beausoleil 01]. Il provient en fait de l'anisothermie de l'air qui n'est pas prise en compte dans la modélisation. De ce fait, le modèle réagit plus vite que la mesure. Compte tenu de l'hypothèse d'homogénéité du volume d'air dans les logiciels de simulation thermique, la puissance frigorifique sensible est transmise intégralement et sans retard sous forme convective au noeud d'air de la cellule. Dans la réalité, la puissance sensible transmise par l'évaporateur ne se fait pas de manière immédiate. Le volume d'air froid soufflé va se répandre de manière non

homogène dans la cellule, la température de la pièce étant théoriquement uniforme au bout d'un temps infini.

Pour tenir compte dans la modélisation en régime transitoire de cette anisothermie, plusieurs démarches sont envisageables : d'une part on peut affiner la modélisation des phénomènes physiques, d'autre part on peut agir de façon empirique sur certains paramètres thermophysiques de définition du modèle pour faire coïncider l'expérimentation avec le modèle.

- La première démarche conduit à utiliser les modèles zonaux mais nécessite une étude dynamique précise des équipements thermiques, et va à l'encontre des hypothèses de base des codes de simulation classiques (homogénéité du volume d'air intérieur). Beausoleil-Morrison a quant à lui couplé un code CFD (Computational Fluid Dynamics) au code de simulation pour affiner les coefficients de convection air/paroi [Beausoleil 01].
- La deuxième démarche (que nous allons adopter) consiste à modifier la capacité thermique de l'air au moyen d'un coefficient multiplicateur déterminé expérimentalement. Ce coefficient généralement compris entre 5 et 10 dépend de la position du jet soufflé à l'intérieur de la pièce, du volume de la pièce [Lebrun 78]. Nous avons quant à nous effectué des mesures dans une cellule expérimentale de 20 m<sup>3</sup> et avons trouvé un coefficient de 7 pour un climatiseur mural [Garde 97]. Ce coefficient (lumped parameter) sera donc multiplié à la capacité de l'air pour tout calcul en régime transitoire pour des pas de temps réduits.

### 3.2.3 La prise en compte de la dégradation des performances énergétiques des systèmes soumis à des cycles marche/arrêt

En 1979, le Département de l'Energy américain (DOE) a mis au point une procédure permettant de prendre en compte la dégradation des performances énergétiques de systèmes à fort nombre de cycles. La procédure utilise deux variables adimensionnées : le Cooling Load Factor (CLF) et le Part Load Factor (PLF). Cette procédure s'appuie principalement sur les travaux de Parken [Parken 77] effectués au national Institute of Standards and Technology (NIST).

Le CLF est le rapport entre l'énergie frigorifique réellement fournie par le système pendant le temps de marche  $t_0$  divisée par l'énergie qu'aurait fournie le système s'il avait fonctionné en régime permanent pendant la durée totale du cycle  $t_{cyc}$ . Son expression mathématique est :

$$CLF = \frac{Q_{tot,cyc}}{Q_{tot,ss} \cdot t_{cyc}} = \frac{\int_0^{t_0} \dot{Q}_{tot,cyc} \cdot dt}{Q_{tot,ss} \cdot t_{cyc}} \quad (21)$$

avec

$Q_{cyc}$  : énergie frigorifique réellement fournie par le système pendant le temps de marche  $t_0$  (kWh)

$\dot{Q}_{ss}$  : puissance frigorifique en régime permanent (kW)

Le PLF est défini comme étant le ratio de l'efficacité frigorifique sur le cycle divisé par l'efficacité frigorifique qu'aurait le système s'il fonctionnait en régime permanent aux mêmes conditions :

$$PLF = \frac{EER_{cyc}}{EER_{ss}} = \frac{PartLoadEfficiency}{SteadyStateEfficiency} \quad (23)$$

$$\text{or } EER_{cyc} = \frac{\int_0^{t_0} \dot{Q}_{tot,cyc} \cdot dt}{P_{abs} \cdot t_0} \quad \text{et} \quad EER_{ss} = \frac{\dot{Q}_{tot,ss}}{P_{abs}} = \frac{\dot{Q}_{tot,ss} \cdot t_0}{P_{abs} \cdot t_0}$$

ainsi

$$PLF = \frac{\int_0^{t_0} \dot{Q}_{tot,cyc} \cdot dt}{\dot{Q}_{tot,ss} \cdot t_0} \quad (24)$$

La relation entre CLF et PLF est très simple. D'après (21) et (24), on a

$$CLF = Fn \cdot PLF \quad (25)$$

avec  $Fn = \frac{t_0}{t_{cyc}}$  étant défini comme le taux de marche

Physiquement, on peut dire que le CLF donne des informations sur l'énergie frigorifique fournie par le système par rapport à l'énergie totale disponible. Le PLF renseigne sur l'efficacité frigorifique réelle du système.

De nombreux auteurs ont travaillé sur la dégradation des performances de système en utilisant le PLF et le CLF [Goldsmith 80], [O'neal 91], [Katipamula 91], [O'Neal 93]. O'Neal et Katipamula proposent une approche intéressante dans la mesure où ceux-ci ont cherché à développer un modèle adimensionné de système permettant de prendre en compte le cyclage de l'appareil.

Les hypothèses de leur modèle sont les suivantes :

- la puissance frigorifique au démarrage suit une exponentielle du premier ordre ;
- la puissance frigorifique en régime permanent est constante pendant la durée de marche  $t_0$ .

En injectant l'expression de la puissance frigorifique totale de l'équation (18). Les auteurs ont résolu l'équation (21) et ont obtenu une nouvelle expression du CLF en fonction de  $Fn$  et d'une variable adimensionnée  $\Omega$  appelée « temps adimensionné »

$$CLF = Fn \cdot \left( 1 + \frac{1}{\Omega} (e^{-\Omega} - 1) \right) \quad (26)$$

$$\text{avec } \Omega = \frac{t_0}{\tau} = \frac{Fn}{\tau \cdot C_r}$$

En utilisant l'équation (25), on peut déduire le PLF

$$PLF = 1 + \frac{1}{\Omega} (e^{-\Omega} - 1) \quad (27)$$

La variable  $\Omega$  contient les trois grandeurs influant le plus sur les performances du système en régime dynamique : la constante de temps du système (qui doit être mesurée expérimentalement), le taux de marche (déterminé par le rapport « besoins du bâtiment » sur la puissance du système) et le nombre de cycles (fonction des caractéristiques du thermostat).

L'intérêt de la démarche est que le modèle peut être couplé à une procédure d'estimation de charges horaires de type Bin Method [ASHRAE 01] pour estimer les consommations des systèmes.

Toutefois des informations suivantes sont nécessaires

- Les puissances frigorifiques et absorbées en régime permanent sont données en fonction de la température extérieure par des modèles mathématiques issus de données constructeurs
- La constante de temps du système doit être mesurée en laboratoire
- Le nombre de cycles  $C_r$  est donné par une équation issue des travaux de Parken [Parken 85] qui relie  $C_r$  à  $Fn$ .

$$C_r = 4 \cdot C_{max} \cdot Fn \cdot (1 - Fn) \quad (28)$$

$C_{max}$  est le nombre maximum de cycles à  $Fn = 0.5$

Ainsi, la variable  $\Omega$  peut être calculée à chaque heure. L'efficacité frigorifique réelle horaire peut donc être calculée à partir du PLF et la consommation électrique du système peut être facilement déterminée.

Toutefois, le modèle proposé ne tient pas compte de la déshumidification au niveau de la batterie. La confrontation du modèle avec des mesures montre des écarts significatifs pour des valeurs de  $\Omega$  inférieures à 10. Par ailleurs, la méthode nécessite la connaissance de  $C_{max}$ .

Or, dans le cas de climats tropicaux et humides, la puissance latente utilisée pour la déshumidification d'un local peut atteindre la moitié de la puissance totale disponible sur la batterie du système. La non prise en compte de l'humidité dans le modèle peut donc générer des erreurs de modélisation importantes.

Les travaux récents sur ce thème ont été réalisés par Henderson [Henderson 92], [Henderson 96]. Celui-ci utilise l'approche ADP/BF pour calculer l'humidité spécifique au

niveau de la batterie [Henderson 00]. L'évolution de l'humidité dans la pièce est calculée à l'aide d'une formule similaire à l'équation (16). L'auteur rajoute toutefois un coefficient multiplicateur (lumped parameter) sur la capacité de l'air égal à 20 pour améliorer la cohérence physique des résultats de simulation.

### 3.3 Développement du modèle

Nous voyons donc à l'issue de la partie précédente que les principales grandeurs intervenant dans le régime dynamique sont le temps de marche et le temps de cycle.

Nous proposons donc de développer un modèle horaire permettant de calculer  $t_0$  et  $t_{\text{cycle}}$ . Par ailleurs, le modèle tiendra compte de l'influence de l'humidité dans les puissances frigorifiques du système.

Les hypothèses de modélisation que nous avons retenues pour notre modèle reprennent celles de la majorité des auteurs, à savoir :

- Les puissances frigorifiques au démarrage suivent une exponentielle du premier ordre;
- La puissance électrique absorbée atteint dès le démarrage sa puissance nominale;
- Le régulateur est un régulateur classique à zone morte;
- Les valeurs du régime permanent sont calculées à partir du modèle adimensionné;
- La capacité de l'air  $C_{ai}$  est multipliée par un coefficient multiplicateur  $K$  pour tenir compte du régime transitoire;
- Les puissances en régime permanent sont constantes pendant la marche du système  $t_0$ .

Ainsi, pour le pas de temps de la seconde, l'équation (15) devient :

$$C_{th} \frac{dT_{ai}}{dt} = \text{Besoins}_{sens} - \dot{Q}_{sens, cyc}$$

$$\text{avec } C_{th} = K \cdot C_{ai}$$

$$\text{et } \dot{Q}_{sens, cyc} = \dot{Q}_{sens, ss} (1 - e^{-t/\tau})$$

En remplaçant  $\dot{Q}_{sens, cyc}$  dans l'équation différentielle, et en supposant que les besoins restent constant durant le fonctionnement du système, nous avons :

$$C_{th} \cdot \int_{T_c + \Delta T_c}^{T_c - \Delta T_c} dT_{ai} = \int_0^{t_0} (\text{Besoins}_{sens} - \dot{Q}_{sens, ss} (1 - e^{-t/\tau})) dt$$

après intégration, nous avons :

$$-2 \cdot C_{th} \cdot \Delta T_c = \text{Besoins}_{sens} \cdot t_0 - \dot{Q}_{sens, ss} (t_0 + \tau(e^{-t_0/\tau} - 1))$$

Soit la fonction  $f(t)$  telle que :

$$f(t) = b + at + k(e^{-t/\tau} - 1) \quad (29)$$

$$\text{avec } b = 2C_{th} \Delta T_c, \quad a = \text{Besoins}_{sens} - \dot{Q}_{sens, ss}, \quad k = -\tau \dot{Q}_{sens, ss}$$



Ainsi, en résolvant l'équation  $f(t) = 0$ , il est possible d'estimer analytiquement la valeur de  $t_0$ . La détermination de cette racine peut être obtenue par la méthode de Newton Raphson.

Par ailleurs, l'équation  $f(t)=0$  n'admet de solution que si  $a \leq 0$ , autrement dit si  $Besoins_{sens} \leq \dot{Q}_{sens,ss}$ . Dans le cas contraire, le système est en marche tout le temps ( $t_0$  infini).

La valeur du temps de cycle  $t_{cycle}$  s'obtient en résolvant l'équation (15) avec  $\dot{Q}_{sens,cyc} = 0$ . L'intégration se fait sur l'intervalle  $t \in [t_0, t_{cycle}]$ .

Ainsi :

$$\begin{aligned} \int_{T_c - \Delta T_c}^{T_c + \Delta T_c} C_{th} \cdot dT_{ai} &= \int_{t_0}^{t_{cycle}} Besoins_{sens} \cdot dt \\ \Leftrightarrow 2 \cdot \Delta T_c \cdot C_{th} &= Besoins_{sens} (t_{cycle} - t_0) \\ \Leftrightarrow t_{cycle} &= t_0 + \frac{2 \cdot \Delta T_c \cdot C_{th}}{Besoins_{sens}} \end{aligned} \quad (30)$$

#### Influence de l'humidité sur $t_0$ et $t_{cycle}$ :

Nous voyons dans les équations obtenues que l'humidité aura un impact sur  $t_0$  et  $t_{cycle}$ . En effet, la valeur de  $t_0$  déterminée de manière analytique fait intervenir la puissance sensible en régime permanent  $\dot{Q}_{sens,ss}$  qui dépend de l'humidité (cf équation (13)). Lorsque l'humidité augmente par exemple, cela se traduit par une augmentation de l'enthalpie de l'air intérieur, et donc une diminution de la puissance sensible. Ceci aura pour effet d'augmenter le temps de marche et par conséquent le temps de cycle, ce qui est tout à fait acceptable physiquement.

### 3.4 Intégration du modèle dans un code de simulation

La détermination analytique de  $t_0$  et  $t_{\text{cycle}}$  permet de calculer les puissances échangées pendant la durée du cycle. De ce fait, l'implémentation du modèle de système dans un code de simulation horaire est alors possible.

La figure 7 décrit l'algorithme général du modèle et de son implémentation par rapport à un code de simulation. Il est à noter que la méthode est applicable pour tout code de simulation horaire.

Le modèle utilise les résultats « classiques » d'un code de simulation. Celui-ci fournit, pour un bâtiment, une température de consigne  $T_c$  et un fichier météorologique donnés, les besoins sensibles horaires nécessaires pour le maintien de la consigne.

Un fichier résultat est ainsi constitué. Ce fichier regroupe les Besoins sensibles, la température extérieure et l'humidité extérieure qui sont nécessaire au calcul des puissances du système et l'évolution de l'humidité.

Les paramètres caractérisant le système sont au nombre de six :

- Trois paramètres caractérisent le régime permanent : la puissance totale en régime nominal, le débit d'air de l'unité intérieure et le facteur de ByPass;
- Trois paramètres caractérisent le régime dynamique : la constante de temps du système, la valeur de la zone morte et le coefficient K caractérisant le régime transitoire.

A  $t=0$ , l'humidité dans la pièce est initialisée car le modèle recalcule pour chaque pas de temps l'évolution de l'humidité dans la pièce selon l'équation (16).

Pour chaque pas de temps (i.e. l'heure), on vérifie si les besoins sensibles sont positifs, autrement dit, s'il y a une demande en froid. Dans ce cas, le modèle calcule tout d'abord l'enthalpie de l'air intérieur, puis la puissance sensible en régime permanent à l'aide de l'équation (13). Notons que  $T_{ai}$  a été remplacé par  $T_c$  dans l'équation car nous supposons que la température de l'air intérieur est égale à la température de consigne sur une heure.

Les valeurs de  $t_0$  et  $t_{\text{cycle}}$  sont alors déterminées grâce aux formules analytiques (29) et (30).

Leur détermination permet ensuite le calcul des énergies frigorifiques et électriques fournies pendant le cycle ( $Q_{\text{tot,cyc}}, Q_{\text{sens,cyc}}, Q_{\text{lat,cyc}}, P_{\text{abs,cyc}}$ ) et sur l'heure ( $Q_{\text{tot,h}}, Q_{\text{sens,h}}, Q_{\text{lat,h}}, P_{\text{abs,h}}$ ).

La valeur de  $Q_{\text{lat,h}}$  est ensuite injectée dans l'équation d'évolution de l'humidité du bâtiment. La nouvelle valeur d'humidité spécifique est calculée et permettra de calculer l'enthalpie du pas de temps suivant et les nouvelles puissances qui en dépendent.

Ainsi, les sorties du modèles sont : les énergies frigorifiques totale, sensible, latente, l'énergie électrique consommée, l'humidité, et également l'efficacité énergétique ou toute autre valeur résultante telle que le PLF ou le CLF définis par l'approche de Katipamula et O'Neal.

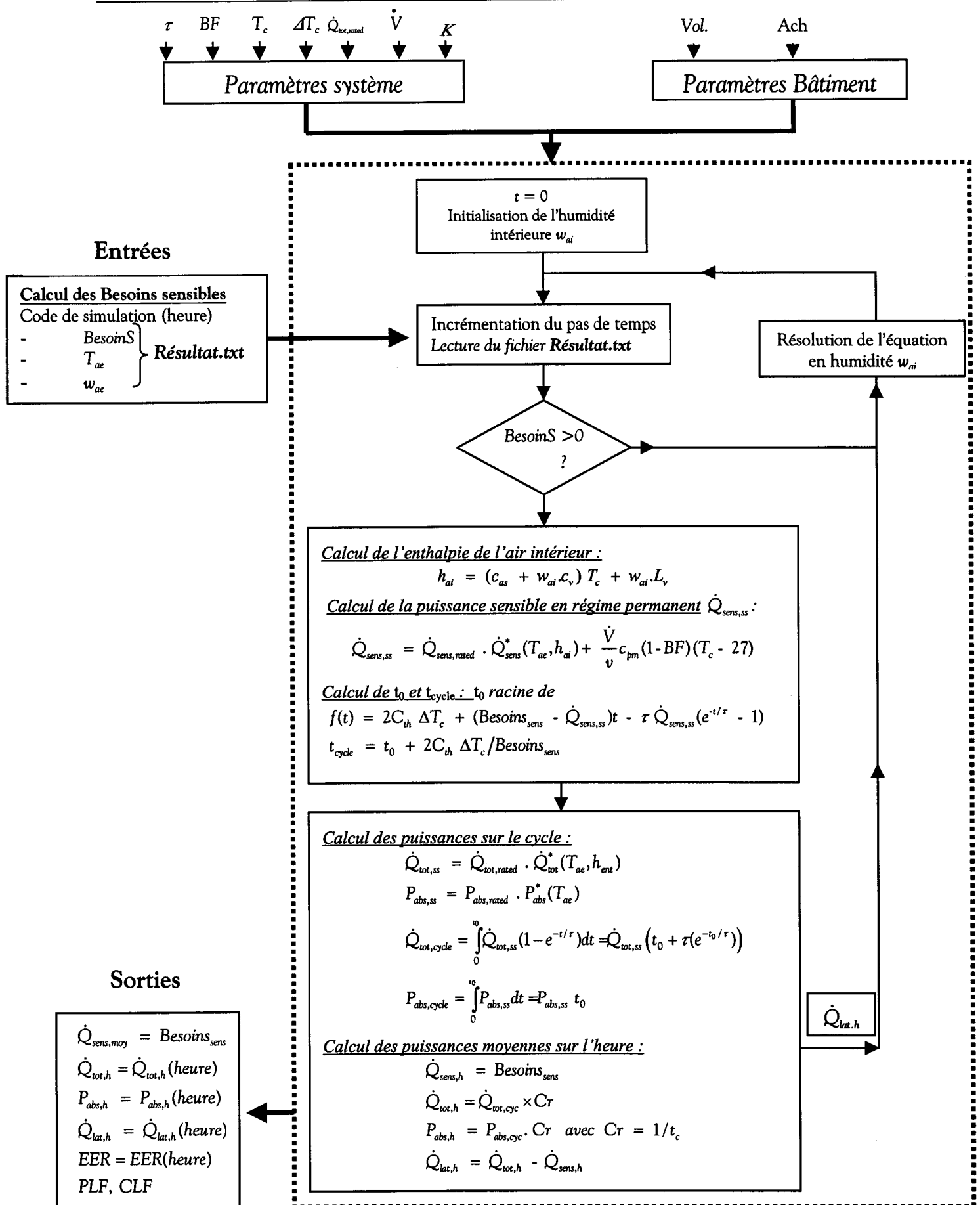


Figure 7 : Algorithme général du modèle adimensionné et de son intégration dans un code de simulation

## 4 Résultats et Discussion

### 4.1 Comparaison inter-modèle entre le pas de temps de la seconde et le pas de temps de l'heure

Afin de vérifier la validité du modèle horaire, nous avons comparé sur une même journée le modèle à pas de temps réduit à la seconde avec le modèle horaire présenté dans la partie précédente pour les six systèmes étudiés dans la partie « régime permanent ».

La résolution du modèle de système à pas de temps réduit est effectuée en couplant les équations thermique et hydrique au pas de temps de la seconde pour le même modèle de bâtiment et le même fichier météorologique.

Nous avons comparé les énergies frigorifiques totale, sensible et absorbée sur une journée entre les deux modèles. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 5.

| Système        | $Q_{tot}$<br>(dt = 1s) | $Q_{tot}$<br>(dt = 1h) | $Ecart.$<br>$Q_{tot}$ | $Q_{sens}$<br>(dt = 1s) | $Q_{sens}$<br>(dt = 1h) | $Ecart$<br>$Q_{sens}$ | $P_{abs}$<br>(dt = 1s) | $P_{abs}$<br>(dt = 1h) | $Ecart$<br>$P_{abs}$ |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| S <sub>1</sub> | 2.00                   | 2.34                   | 17%                   | 1.44                    | 1.54                    | 7%                    | 0.89                   | 0.98                   | 11%                  |
| S <sub>2</sub> | 1.90                   | 2.25                   | 18%                   | 1.42                    | 1.54                    | 8%                    | 0.95                   | 1.06                   | 12%                  |
| S <sub>3</sub> | 1.80                   | 1.41                   | 25%                   | 1.41                    | 1.54                    | 9%                    | 1.05                   | 1.18                   | 12%                  |
| S <sub>4</sub> | 1.81                   | 2.25                   | 25%                   | 1.43                    | 1.54                    | 7%                    | 1.15                   | 1.26                   | 9%                   |
| S <sub>5</sub> | 1.73                   | 2.16                   | 24%                   | 1.43                    | 1.54                    | 8%                    | 1.38                   | 1.52                   | 10%                  |
| S <sub>6</sub> | 1.66                   | 2.10                   | 26%                   | 1.39                    | 1.54                    | 10%                   | 1.54                   | 1.74                   | 13%                  |

Tableau 5 : Comparaison des énergies frigorifiques et absorbées modélisées entre le modèle à pas de temps réduits et le modèle horaire sur une journée

Nous observons que les énergies sensibles et absorbées sont sensiblement équivalentes avec une erreur relative qui reste inférieure à 10% pour les six systèmes modélisés, ce qui est acceptable.

Par contre, on observe des écarts importants au niveau de l'énergie frigorifique totale. Le modèle horaire surestime de 25% en moyenne. L'erreur provient en fait de la méthode de calcul de  $\dot{Q}_{sens,ss}$  dans le modèle horaire. Nous avons vu précédemment (voir figure 7) que  $\dot{Q}_{sens,ss}$  dépend de l'enthalpie et qu'il conditionne le calcul de  $t_0$ . La différence entre le modèle horaire et le modèle à pas de temps réduit provient du fait que la valeur de  $\dot{Q}_{sens,ss}$  pour le modèle horaire est déterminée avec l'enthalpie de l'air au démarrage du système (donc à  $t=0$ ), alors que, pour le modèle réduit, celle-ci est re-calculée à chaque pas de temps. De ce fait, comme l'humidité va avoir tendance à diminuer lorsque le système est en marche,  $\dot{Q}_{sens,ss}$  sera sous estimé par le modèle à pas de temps horaire, et par conséquent  $t_0$  sera plus important. Le modèle horaire va donc surestimer les charges latentes, ce qui explique les écarts de 25% observés pour les six systèmes. Des modifications doivent donc être apportées au modèle horaire pour le calcul de  $\dot{Q}_{sens,ss}$ .

## 4.2 Eléments de validation expérimentale

Une campagne de mesure de 4 jours a été réalisée en novembre 2000 dans une cellule expérimentale en environnement naturel afin de comparer les résultats du modèle horaire par rapport à la mesure.

La cellule expérimentale occupe un volume de  $27 \text{ m}^3$ , ce qui correspond aux dimensions d'une pièce d'habitation. Cette cellule est utilisée pour la validation expérimentale de modèles d'enveloppe [Garde 97], [Mara 00] et pour la validation de systèmes couplés à un bâtiment [Garde 01].

Le système utilisé pour les mesure est équivalent au système 4 (voir tableau 1). La consigne  $T_c$  était fixée à  $23^\circ\text{C}$  pendant les quatre jours de simulations (répertoriés 312 à 315)



Figure 8 : Cellule expérimentale en environnement naturel pour l'étude du couplage système/enveloppe.

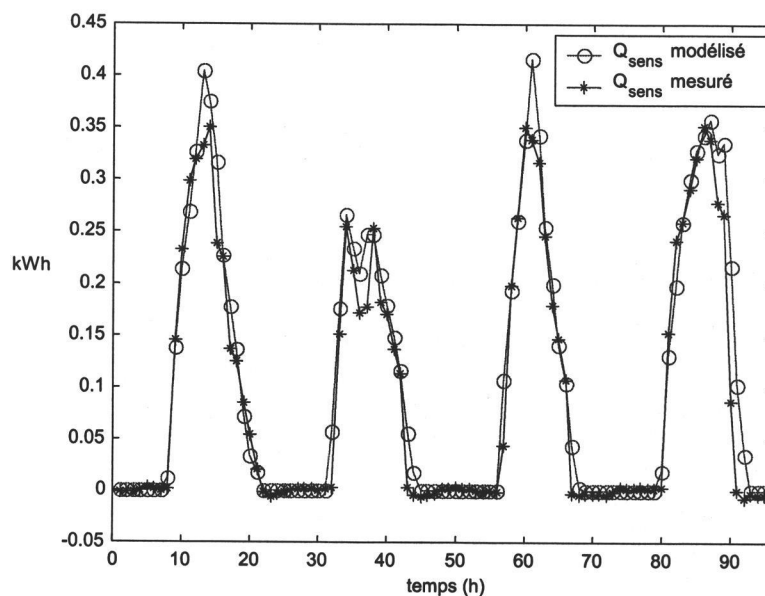


Figure 8 : Comparaison mesure/modèle – puissance sensible

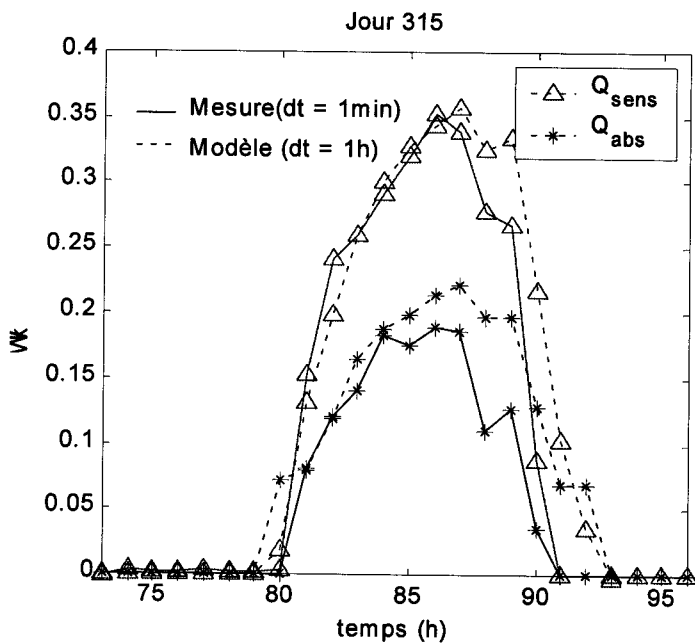


Figure 9 : Comparaison mesure/modèle de la puissance sensible (horaire)

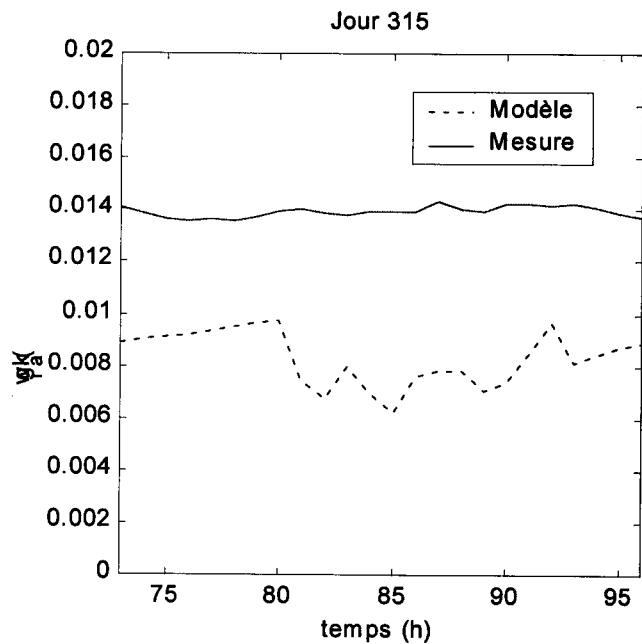


Figure 10 : Comparaison mesure/modèle Humidité spécifique intérieure

Les résultats observés sur la figure 8 montrent que la puissance sensible est correctement modélisée. Les courbes mesure/modèle reproduisent les mêmes variations et les écarts observés sont inférieurs à 5%.

Le figure 9 quant à elle représente la comparaison de la puissance sensible et de la puissance absorbée entre la mesure et le modèle horaire (correspondant au système 4) en zoomant sur le jour 315. La puissance sensible reste correctement modélisée avec une légère surestimation. La conséquence est que la puissance absorbée est également légèrement surestimée par le modèle horaire (environ 10%) : puisqu'il y a des besoins sensibles, le système fonctionne et donc consomme de l'énergie électrique.

En comparant les humidités spécifiques modélisées et mesurées (voir figure 10), on constate toutefois qu'il y a un offset constant de 6 g/kgas avec une fluctuation plus importante de l'humidité du modèle. Le modèle donne une humidité spécifique comprise entre 7 et 9 g/kgas (ce qui correspond à une humidité relative de l'ordre de 45% avec  $T_c = 23^\circ\text{C}$ ) alors que la mesure donne une valeur peu fluctuante égale 14 g/kgas. (HR = 80%). L'explication peut provenir de l'effet de réhumidification de l'air par l'évaporateur provenant de la condensation sur la batterie. Lorsque le ventilateur de l'évaporateur reste en marche, Henderson a notamment constaté que l'évaporateur refroidit la pièce par « evaporative cooling » [Henderson 96]. Ceci expliquerait l'humidité constante dans la pièce constatée par les mesures et la surestimation de la puissance absorbée.

Nous voyons donc à l'issue de ces premiers résultats que les variations d'humidité influent grandement sur les résultats du modèle horaire. Même si la puissance sensible est correctement modélisée et que les résultats sont plutôt encourageants, les travaux futurs vont

concerner une meilleure approche dans l'équation liée à l'évolution de l'humidité spécifique et au fonctionnement de la batterie froide dans le local modélisé. En effet, comme les puissances frigorifiques et le temps de marche dépendent de l'humidité, il s'agit d'une variable importante sur laquelle nos efforts vont converger pour améliorer la précision de nos résultats.

### 4.3 Influence du dimensionnement du système sur les consommations, le taux de marche et l'efficacité frigorifique

Nous voulons dans cette partie illustrer l'utilité du modèle proposé pour mesurer l'impact du dimensionnement de split-systèmes par rapport aux besoins réels du bâtiment à traiter.

Nous avons comparé ici les six systèmes de puissance nominale croissante et quantifié l'effet du surdimensionnement sur les consommations frigorifiques électriques, l'efficacité frigorifique et le taux de marche.

Les simulations ont eu lieu sur une journée avec une consigne en température de 23°C.

Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

| Système | Qtot<br>nom | Pabs<br>nom | Eff<br>nom | Energie<br>frigo tot<br>(kWh) | Energie<br>sensible | Consom.<br>Elec<br>(kWh) | Eff | t <sub>o</sub> (s)<br>(14h00) | Cr<br>(14h00) | Fn   |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------|-----|-------------------------------|---------------|------|
| S1      | 1.70        | 0.63        | 2.7        | 2.16                          | 1.54                | 0.90                     | 2.4 | 331                           | 3.6           | 0.33 |
| S2      | 2.10        | 0.78        | 2.7        | 2.25                          | 1.54                | 1.06                     | 2.1 | 271                           | 3.8           | 0.29 |
| S3      | 2.80        | 1.01        | 2.8        | 2.26                          | 1.54                | 1.18                     | 2.0 | 197                           | 4.2           | 0.23 |
| S4      | 3.30        | 1.25        | 2.6        | 2.25                          | 1.54                | 1.26                     | 1.9 | 171                           | 4.25          | 0.20 |
| S5      | 5.10        | 1.80        | 2.8        | 2.16                          | 1.54                | 1.52                     | 1.5 | 128                           | 4.46          | 0.16 |
| S6      | 6.80        | 2.74        | 2.5        | 2.10                          | 1.54                | 1.74                     | 1.3 | 107                           | 4.6           | 0.14 |

Tableau 6 : Influence du surdimensionnement d'un système par rapport aux besoins du bâtiment

Nous pouvons observer une dégradation des performances au niveau de la consommation électrique. Les consommations frigorifiques sont les même pour les six systèmes mais le Fn est divisé par plus de 2 entre le système 1 ( $Fn=0.33$ ) et le système 6 ( $Fn=0.14$ ). Au niveau de la consommation journalière, le système 6 consomme deux fois plus que le système 1. Le modèle permet également de déterminer le nombre de cycle (compris entre 3.6 pour  $S_1$  et 4.6 pour  $S_6$ ).

Ainsi, le modèle adimensionné de couplage système/bâtiment que nous proposons dans ce papier permet d'avoir une approche réaliste du fonctionnement de split-système en tenant compte de la dégradation des performances du système due au cyclage de l'appareil. Il permet de mieux appréhender les problèmes de prédiction des consommations énergétiques de bâtiments composés de split-systèmes à fort taux de cyclage.

#### 4.4 Influence des charges latentes sur le rendement d'un système

Il s'agit ici de mettre en évidence l'influence que peut avoir une humidité importante dans une pièce à climatiser sur les performances de l'appareil. Physiquement, la batterie va avoir tendance à utiliser une partie de la puissance frigorifique totale disponible pour déshumidifier. De ce fait, à puissance totale constante, si l'humidité de l'air augmente, la puissance sensible disponible est plus faible et donc le temps de marche devient plus important. En d'autre terme, une humidité importante va augmenter le temps de marche de l'appareil car la puissance sensible disponible diminue.

| Charges latentes | Energie frigo totale | Energie Frigo sensible | Energie Frigo latente | Conso électrique | Eff  | Fn  |
|------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|------|-----|
| 0 W              | 2.253                | 1.537                  | 0.716                 | 1.257            | 1.79 | 14% |
| 100 W            | 2.631                | 1.537                  | 1.094                 | 1.348            | 1.95 | 24% |
| 200 W            | 3.003                | 1.537                  | 1.466                 | 1.468            | 2.05 | 25% |
| 400 W            | 4.220                | 1.537                  | 2.683                 | 1.752            | 2.41 | 30% |

Tableau 7 : Influence des charges latentes sur les performances du système S4 sur une journée

Nous avons simulé sur un même jour le couple cellule LGI/système n°4 avec des charges latentes différentes variant de 0 à 400W.

Le tableau 7 montre l'influence des charges sur les consommations énergétiques et électriques journalières. On constate que l'énergie sensible fournie par le système ne varie pas, ce qui est tout à fait normal. Par contre, l'énergie frigorifique latente croît avec les charges. Pour 200 W de charges latentes, l'énergie latente que doit fournir le système est égale à l'énergie sensible. On voit également que le taux de marche augmente : il est deux fois plus important avec 400 W de charges latentes.

Le modèle de split-système couplé au modèle d'enveloppe donne donc des résultats cohérents physiquement.

Toutefois, au delà des tests de cohérence, des comparaisons inter-modèle et des éléments de validation présentés au cours des sections précédentes, il apparaît évident qu'une campagne de mesures plus complète est indispensable. Cette campagne doit porter à la fois sur une cellule en environnement naturel pour l'étude des couplages système/enveloppe mais également en environnement contrôlé pour l'étude plus spécifique du processus de déshumidification/humidification au niveau de l'évaporateur en régime transitoire.



## 5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce papier le développement d'un modèle adimensionnel permettant de prendre en compte le comportement de split-systèmes en régime permanent et en régime transitoire. Une méthode de couplage du modèle avec un code de simulation en régime dynamique a été proposée. Le modèle de système a été établi à partir d'une base de données « constructeur » portant sur des puissances frigorifiques comprises entre 1.7 et 6.8kW.

Concernant le régime permanent, le modèle de système nécessite trois paramètres : la puissance frigorifique totale en régime nominal, le facteur de ByPass de la batterie froide et le débit de l'air soufflé au niveau de l'évaporateur. Il s'agit d'un modèle mathématique adimensionné qui calcule les puissances frigorifiques totale, sensible et absorbée en fonction de l'enthalpie de l'air intérieur et la température extérieure pour le régime permanent.

La modélisation du régime dynamique nécessite la connaissance de quatre paramètres : la constante de temps  $\tau$  du système (déterminée expérimentalement), la température de consigne du système  $T_c$ , la zone morte du régulateur  $\Delta T_c$  et un coefficient d'ajustement  $K$  prenant en compte les mouvements d'air liés aux phénomènes transitoires.

Le couplage du modèle à un code de simulation thermo-aéraulique de bâtiment permet de déterminer au pas de temps de l'heure le temps de marche et le temps de cycle du système, les puissances frigorifiques totale, sensible et absorbée fournies à l'ambiance ainsi que l'évolution de l'humidité dans la zone climatisée (le système régule seulement sur la température d'air et l'humidité est laissée en évolution libre). L'algorithme proposé s'applique à tout code de simulation de bâtiment capable de déterminer les besoins sensibles pour une consigne donnée.

Les premiers résultats de simulation et la confrontation avec les mesures montrent que le modèle donne des résultats très satisfaisants concernant la prédiction des puissances sensibles et absorbées. Par contre, des écarts de 25% ont été observés principalement à cause d'une mauvaise prise en compte de l'humidité dans le local.

Les travaux futurs vont concerner une meilleure approche dans l'équation liée à l'évolution de l'humidité spécifique et au fonctionnement de la batterie froide dans le local modélisé. En effet, comme les puissances frigorifiques et le temps de marche dépendent de l'humidité, il s'agit d'une variable importante sur laquelle nos efforts vont converger pour améliorer la précision de nos résultats. Il apparaît évident qu'une campagne de mesures plus complète est indispensable. Cette campagne portera à la fois sur une cellule en environnement naturel pour l'étude des couplages système/enveloppe mais également en environnement contrôlé pour l'étude plus spécifique du processus de déshumidification/humidification au niveau de l'évaporateur en régime transitoire.

## Chapitre 4

# Le transfert des connaissances de la recherche vers les pratiques professionnelles

## Le cas de la conception thermique des bâtiments en climat tropical

*La thématique traitant du problème de l'utilisation d'outils simplifiés à usage de la profession et d'« approche globale » est au cœur de réflexions internationales ; notre équipe s'est illustrée par un nombre conséquent de publications sur le thème [Garde 99], [Garde 01a]. Ce chapitre expose une réflexion sur cette thématique issue de l'expérience acquise sur les 7 dernières années et se propose de montrer qu'une collaboration efficace est possible entre les différents intervenants de l'acte de construire. Nous allons voir qu'en produisant un document de travail pédagogique, compréhensible par tous et basé sur des règles expertes, il est possible de réaliser des bâtiments adaptés au climat et de diffuser le savoir scientifique vers les pratiques professionnelles. Nous illustrerons nos propos en décrivant la méthodologie que nous avons suivie sur un projet de bâtiment en climat tropical. Enfin, nous présenterons le bilan de la période 1997-2001 et l'impact qu'une telle collaboration a eu sur l'architecture en climat tropical. Il est à noter que le texte vient d'être accepté pour publication dans la revue « Energy and Buildings » [Garde 01c].*

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Introduction : le contexte général .....</b>   | <b>123</b> |
| <b>2</b> | <b>Les outils disponibles en thermique du bâtiment.....</b>   | <b>124</b> |
| 2.1      | Les règles expertes.....  | 125        |
| 2.2      | Les codes simplifiés ou adaptés.....  | 125        |
| 2.3      | Les codes spécialisés .....   | 125        |
| <b>3</b> | <b>Le cas particulier des DOM dans le domaine de la conception thermique des bâtiments .....</b>                                    | <b>126</b> |
| <b>4</b> | <b>Le problème du transfert de connaissance de la recherche vers les professionnels du bâtiment .....</b>                           | <b>127</b> |
| <b>5</b> | <b>Une exploitation structurée des règles expertes : L'opération expérimentale Ecodom .....</b>                                     | <b>128</b> |
| <b>6</b> | <b>Quelques prescriptions issues du document de référence [Célaire 97]</b>  | <b>130</b> |
| <b>7</b> | <b>Illustration d'une collaboration réussie entre architecte et thermicien grâce au document ECODOM : le projet « Phénix ».....</b> | <b>131</b> |
| 7.1      | Phase esquisse.....   | 131        |
| 7.2      | Phase APS .....   | 131        |
| 7.3      | Phase APD .....   | 131        |
| 7.4      | DCE.....  | 132        |
| 7.5      | Phase chantier - réalisation.....   | 132        |
| <b>8</b> | <b>Bilan de la période 1997-2001 .....</b>  | <b>135</b> |
| 8.1      | Impact sur l'architecture .....   | 135        |
| 8.2      | Validation et retour d'expérience.....  | 137        |
| <b>9</b> | <b>Conclusion.....</b>  | <b>137</b> |

# 1 Introduction : le contexte général

La question thermique, c'est-à-dire la prise en compte duale des consommations d'énergie et de la qualité des ambiances, fait aujourd'hui partie du faisceau complexe de contraintes que doit gérer un architecte ou un urbaniste. Que ce soit sous la pression des textes réglementaires (européens, nationaux...) ou celle de la recherche de performance, on observe depuis deux décennies une réelle tendance à l'amélioration des qualités de l'espace bâti et de son environnement. La meilleure preuve de cette tendance est l'émergence toujours plus grande de projets à haute qualité environnementale (projet HQE), représenté par la figure 1. Cette demande de qualité supplémentaire induit des besoins nouveaux d'outils d'aide à la conception et des modifications d'habitude de travail entre les différents acteurs du bâtiment. Car il faut noter que, si depuis fort longtemps, les problèmes généraux d'énergie et de confort hygrothermique sont abordés par les architectes, c'est surtout de manière empirique et au plan qualitatif. Aujourd'hui, ces concepteurs ainsi que les maîtres d'ouvrage expriment clairement un besoin de connaissances inductrices de solutions performantes, de nouveaux outils dont l'évolution va dans le sens d'une meilleure évaluation de leurs projets, mettant à profit les capacités de simulation numérique des ordinateurs.

Or, la qualité d'un projet doit pouvoir s'évaluer au travers de critères mesurables. Le projet n'étant, par définition, pas encore réalisé, c'est sur sa description comme objet théorique que le concepteur souhaite faire de l'évaluation prédictive. Cette évaluation quantitative incitant à des itérations de conception (modification des composants du projet) convergeant vers une meilleure performance, technologiquement et économiquement justifiée.

Depuis une vingtaine d'années, la communauté scientifique des chercheurs s'est employée, avec plus ou moins de succès, à produire les outils les plus adaptés permettant d'aider l'architecte dans sa quête de performance (dont le principe n'est antinomique de la qualité architecturale que lorsque ces outils sont mal maîtrisés). En réalité, le développement de ces outils a rencontré plusieurs difficultés dont les plus marquantes sont :

- le fossé culturel séparant l'architecte et le scientifique, dans le domaine de la thermique. Ce fossé est principalement dû aux systèmes de formation, peu soucieux de l'interdisciplinarité et donc de la communication de deux mondes de pratiques professionnelles.
- Le caractère marginal de la thermique dans le projet, dont on pense à tort qu'elle ne générera pas de difficulté majeure. C'est-à-dire que si des difficultés se présentaient, on dispose d'un arsenal technologique permettant de les résoudre... au prix d'une dépense énergétique importante, de coûts monétaires élevés, d'un renoncement à la qualité environnementale.
- Le caractère ultra-spécialisé de certains outils, requérant de très bonnes connaissances en thermique et décourageant l'architecte d'un usage régulier dans le projet. Cette non-appropriation par le concepteur condamne l'outil, qui manque ainsi totalement sa cible, réduisant encore la communication efficace entre les thermiciens et les concepteurs. La rareté et les faiblesses constatées de ces outils nous ont incités à réfléchir à leur typologie et à nous pencher sur leur mode de production.
- Le manque de temps de l'architecte qui permet difficilement l'apprentissage d'un outil d'aide à la conception en thermique, ce dernier ayant suffisamment à faire entre ses propres outils de DAO, la gestion de ses projets et de ses chantiers en cours. N'oublions pas que la majeure partie des

architectes travaillent dans le secteur privé où optimisation du temps et rentabilité en sont les principales caractéristiques.

Face à ces difficultés réelles, on peut se demander quels sont les outils disponibles et utilisables par l'architecte et le thermicien et quelles solutions peuvent être trouvées pour qu'une collaboration efficace soit possible. C'est l'objectif des travaux que nous présentons dans les lignes suivantes : proposer les outils d'aide les mieux adaptés à la conception du projet pour une amélioration de la qualité thermique et énergétique des bâtiments, sans toutefois sacrifier au mode de vie des habitants.

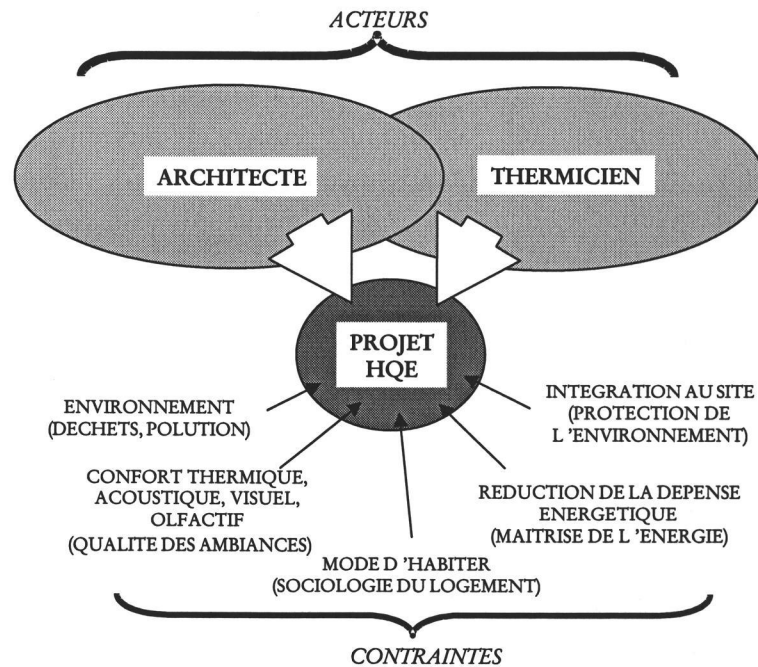


Fig. 1 : Contraintes et acteurs autour du projet à haute qualité environnementale (HQE)

## 2 Les outils disponibles en thermique du bâtiment

Le développement du projet de conception de bâtiment est une opération mettant principalement en présence deux interlocuteurs dont les cultures sont restées, en France en particulier, assez différentes. L'architecte amorce le projet, à partir d'un document de programme fourni par le maître d'ouvrage, dans lequel sont spécifiées toutes les contraintes à respecter : c'est la phase d'esquisse à laquelle est rarement associé l'expert thermicien. La relation entre l'architecte et le thermicien s'établit en général à partir de la phase APS. Cette progression vers une meilleure définition des composantes du projet (environnement, enveloppe, systèmes technologiques) est traduite, dans la réalité des pratiques professionnelles, par l'évolution des outils d'aide et mis en œuvre dans le projet. En d'autres termes, on dira qu'à chaque étape du projet correspond une catégorie d'outils. La figure 2 illustre le principe du projet et la typologie des outils utilisés.

On distingue donc 3 types d'outils auquel seront confrontés l'architecte et le thermicien :

## 2.1 Les règles expertes

Ce sont des connaissances générales (sur le site, le climat, l'enveloppe) ou locales (sur les composants). Elles sont été élaborées par les praticiens, sur la base de leur expertise du domaine, ou bien par des chercheurs spécialisés sur un sujet donné [Depecker 01]. Elles prennent la forme de règles formulées simplement : règles de choix, règles de tendances. Celles-ci sont très peu utilisées, doivent être adaptées à un type de bâtiment et de climat [Mathews 96], [Malama 96].

## 2.2 Les codes simplifiés ou adaptés

Ce sont des codes de calcul dont l'environnement logiciel est très ergonomique, permettant un usage facile par l'architecte, qui conserve ainsi une certaine autonomie dans les phases d'itérations sur l'architecture du bâtiment. Ces codes sont élaborés à partir de modèles physiques, mathématiques et numériques simplifiés, donc rapides, et produisant des résultats dont la précision est largement suffisante dans la phase d'avant projet [Carrier 60]. Les modèles utilisés sont souvent des modèles nodaux, à faible nombre de nœuds par exemple, ou bien des modèles cognitifs fondés sur les réseaux de neurones. On peut citer par exemple les codes utilisant les modèles R2C dans la modélisation des phénomènes conductifs ou les modèles globaux pour la convection et la rayonnement.

## 2.3 Les codes spécialisés

Ce sont des codes de calcul élaborés sur la base des modèles physiques, mathématiques et numériques sophistiqués, issus de la recherche universitaire. Mis à disposition des grands bureaux d'études, ils requièrent un niveau de connaissance avancé des phénomènes de thermo-aéraulique du bâtiment. Dotés d'une ergonomie souvent déficiente (interface utilisateur spécialisé) ils ne sont utilisés que par des thermiciens formés à leur exploitation. Les modèles exploités sont des modèles de champ, à maillage fin, dans les parois et dans les volumes habités. Ils se prêtent mal à un usage en boucle itérative, en raison de temps de calcul bien plus importants, de saisie de données et d'exploitation de résultats beaucoup plus lourdes que pour les codes adaptés. Enfin, ils exigent souvent un support de calcul informatique puissant. Ils ne sont donc utilisés, dans le processus de projet, qu'en phase de vérification - évaluation, lorsque le projet est figé et que les enjeux suscitent le recours à des outils d'étude très sophistiqués et coûteux. On retrouve ici les outils à modèles détaillés tels que CODYRUN [Boyer 98], DOE2 [Winkelman 93], ESPr [ESRU], TRNSYS [TRNSYS 97] ou CLIM2000 [Bonneau 93], et d'une manière générale les codes de simulation en régime dynamique. A un niveau supérieur, on retrouve également l'ensemble des codes CFD.

Dans les faits, le processus idéal et le couplage outil/avancement du projet indiqué par la figure 2 reste limité à des projets où les financements importants permettant de faire appel à des bureaux d'études spécialisés pour l'utilisation des outils détaillés. Pour les bâtiments à budget limité tels que les logements sociaux, la stratégie doit être différente car le recours à ces outils est financièrement impossible.

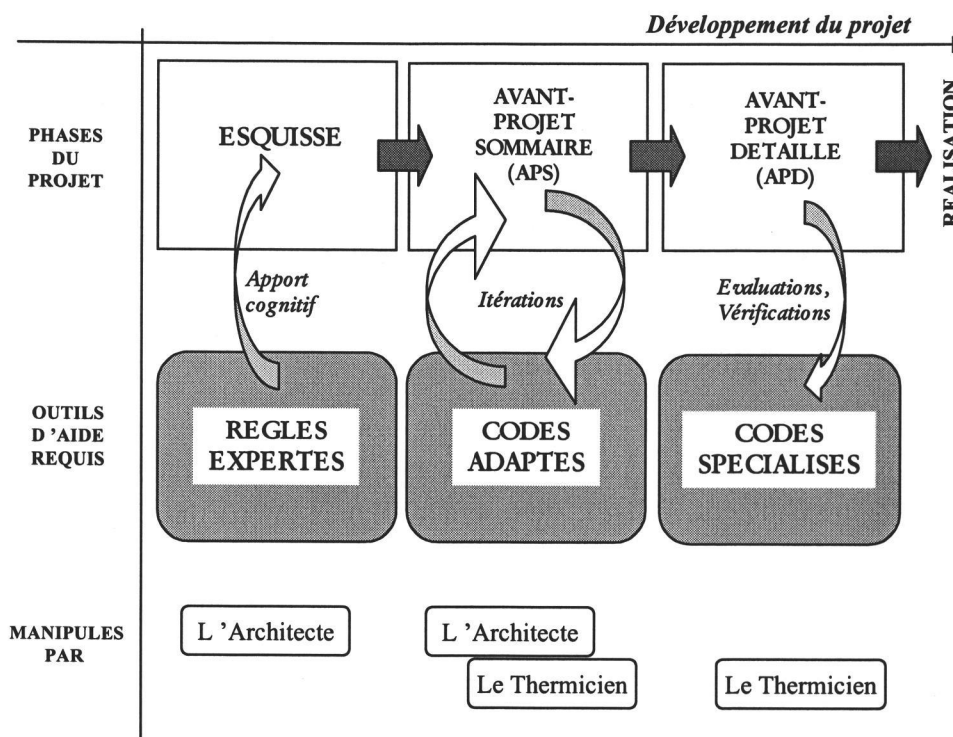


Fig. 2 : Enchaînement des différentes étapes du projet et typologie des outils d'aide à la conception requis au fil d'un processus idéal

### 3 Le cas particulier des DOM<sup>1</sup> dans le domaine de la conception thermique des bâtiments

Le cas des DOM constitue un cas à part dans les relations qui peuvent exister entre l'architecte et le thermicien. Le climat de ces régions est de type tropical humide et de ce fait la réglementation thermique (applicable en France métropolitaine) ne s'applique pas. Ainsi, l'architecte n'est pas obligé de consulter un thermicien lors de l'élaboration de son projet. La relation existe bien dans le cas de projets de bâtiments climatisés (principalement des bâtiments tertiaires) où l'architecte doit faire appel à un bureau d'étude thermique pour le dimensionnement des installations de climatisation, mais dans le secteur du logement où les bâtiments sont passifs (au sens où ils ne possèdent pas de système de conditionnement d'air), l'architecte consulte très rarement le thermicien. De ce fait, on a longtemps assisté dans les DOM au développement de bâtiments totalement inadaptés au climat tropicaux et dont l'architecture était directement transposée de celle des climats tempérés. Le manque de formation des architectes dans le domaine de l'architecture tropicale a favorisé cette tendance : en effet, les réponses à apporter pour obtenir les conditions de confort intérieures sont, en France métropolitaine et dans les départements d'Outremer (DOM), en opposition complète. Dans le premier cas, on cherche à réduire les déperditions thermiques et les renouvellement d'air et à maximiser les apports solaires, dans le second on souhaite se protéger au maximum du soleil et à favoriser la ventilation naturelle. Par ailleurs, l'évolution des modes

<sup>1</sup> La France possède 4 Départements d'Outremer : deux sont situées dans les caraïbes (Iles de Guadeloupe et de Martinique), un au Nord du Brésil (Guyane) et le dernier dans l'océan indien à l'Est de Madagascar (Ile de La Réunion)

constructifs modernes, répondant aux contraintes socio-économiques contemporaines couplée à l'introduction de matériaux ou procédés nouveaux et peu coûteux (béton, menuiseries coulissantes), a permis la réalisation de bâtiments certes peu chers mais thermiquement inconfortables.

De plus, pour faire face à une démographie importante, 20 000 logements (dont une majeure partie de logements sociaux) doivent être construits dans les DOM chaque année. Si l'on considère une augmentation générale du niveau de vie, la baisse constante des appareils de climatisation individuelle, l'électricité vendue à perte dans les DOM compte tenu des appareils de production coûteux, l'amélioration de la conception thermique des bâtiments dans le domaine du logement constitue un enjeu considérable à la fois économique, énergétique, social et environnemental.

Pour faire face à cette menace potentielle, une action d'amélioration de la conception thermique des logements neufs a été initiée en 1995 sous l'impulsion d'Electricité de France. Cette action de maîtrise de l'énergie baptisée « Opération expérimentale ECODOM » a été élaborée dans un vaste partenariat français : Ministère du Logement, Ministère de l'Industrie, Ministère des DOM, E.D.F., ADEME, DDE, Maîtres d'Ouvrages locaux, publics et privés, bureaux d'études thermiques, architectes, associations Consuel et Promotelec et l'Université de la Réunion.

L'objectif annoncé était de mettre en place un label de qualité à grande échelle afin d'améliorer la conception thermo-aéraulique des enveloppes de l'ensemble des logements neufs. Le succès d'une telle opération passait bien évidemment par une incitation financière incontournable (une prime de 1500 euros est accordée pour tout logement satisfaisant aux critères de qualité) mais également par l'utilisation de l'outil de travail à mettre en place (code de simulation ou document papier) pour permettre aux architectes, aux bureaux d'études et aux universitaires de travailler ensemble dès la phase esquisse du projet.

## **4 Le problème du transfert de connaissance de la recherche vers les professionnels du bâtiment**

Comme Glicksman le souligne à juste titre dans [Glicksman 00], pour que le transfert de connaissance puisse se faire de la recherche vers les pratiques professionnelles, l'architecte et le physicien doivent non seulement collaborer dès le début du projet mais également utiliser des outils simplifiés. Ce point très important est également rappelé par Milo [Milo 00] et Schuler [Schuler 95] au vu de leur propre expérience dans la réalisation de bâtiments économes en énergie. D'une manière globale, la tendance actuelle est à l'utilisation d'outils appropriés et de modèles simplifiés. Mathews a notamment proposé une approche basée sur l'utilisation d'un code de simulation [Joubert 89] pour aboutir à des règles expertes visant à améliorer la qualité énergétique de logements sociaux en Afrique du Sud. Celui-ci propose différentes solutions et évalue l'impact énergétique de chaque solution sur la consommation énergétique du logement étudié [Mathews 96].

Mais le principal problème réside en la diffusion de la connaissance de ces règles expertes auprès des professionnels du bâtiment pour une utilisation à grande échelle.

Aussi, de l'avis de tous les partenaires impliqués dans le projet ECODOM, le meilleur moyen pour que les acteurs du bâtiment puissent travailler ensemble était de produire un document papier de 30 pages maximum présentant de manière simple les différentes solutions passives à prendre en compte. Ces règles expertes seraient réalisées à partir d'un code spécialisé qui garantirait la rigueur scientifique des résultats, mais au niveau de l'utilisation sur le terrain, il faudrait produire un outil simple d'utilisation, pédagogique et permettant une communication et des itérations rapides



pendant toutes les phases d'avancement du projet entre des personnes de cultures scientifiques différentes. La figure 3 illustre bien le mode de fonctionnement qui sera le notre avec une intervention dès la phase esquisse avec l'architecte et un suivi jusqu'à la réalisation finale du projet.

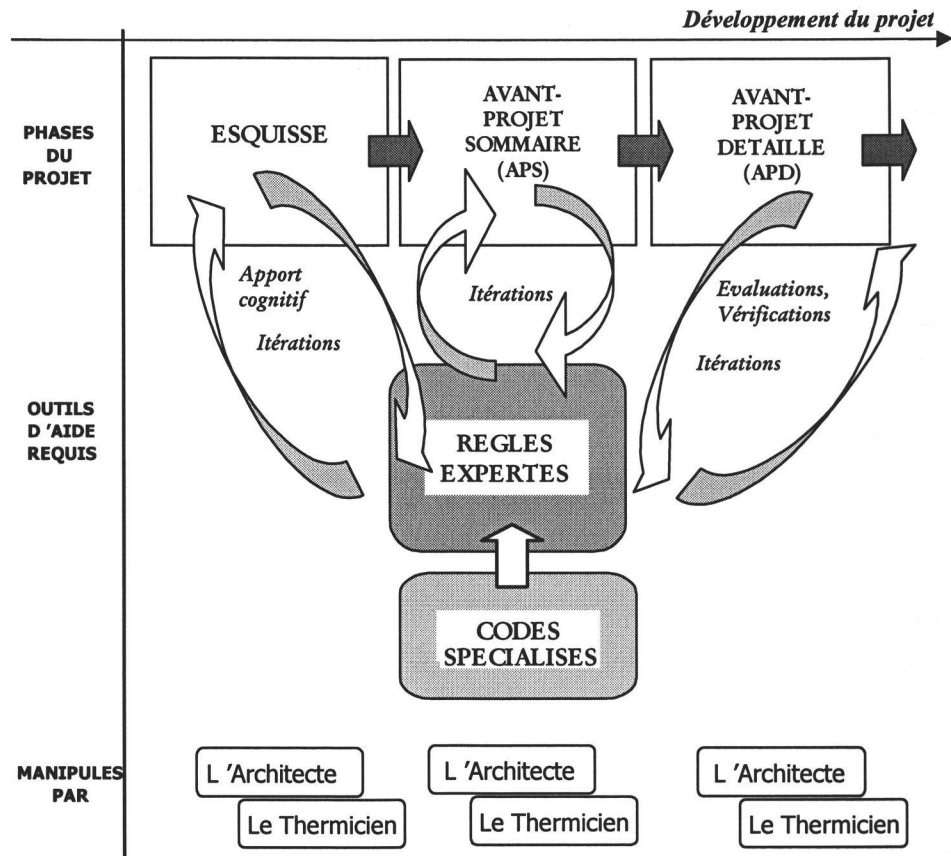


Fig. 3 : Enchaînement des étapes du projet appliquées pour un projet « ECODOM » : Pour des projets à faible budget (logements), les règles expertes (élaborées à partir de codes spécialisés) constituent le seul et véritable outil utilisé en pratique à la fois par l'architecte et le thermicien à toutes les étapes du projet.

## 5 Une exploitation structurée des règles expertes : L'opération expérimentale Ecodom

Notre effort s'est donc logiquement porté sur le premier type d'outils : *les règles expertes*. Notre préoccupation a été celle d'universitaires animés par la volonté de faire descendre vers le secteur aval le bénéfice de la recherche en matière de modélisation. Constatant l'attente des acteurs de la profession, totalement démunis devant des questions thermiques dont la complexité est réelle, nous nous sommes employés à produire et transmettre des connaissances obtenues par « l'expérimentation numérique ».

L'ensemble de nos travaux a donc convergé vers la rédaction d'un fascicule pédagogique décrivant les principes de conception à appliquer, déduits des règles expertes que nous avons élaborées.

L'élaboration de l'opération expérimentale ECODOM a reposé sur trois phases :

1. Mise en place des prescriptions simples et pédagogiques portant sur les divers constituants de l'enveloppe du bâtiment (de 1995 à 1997) ;

2. Validation des prescriptions par un suivi expérimental et sociologique sur les premiers projets ECODOM, retour d'expérience (1998-99);
3. Application de ces prescriptions ECODOM sur des opérations de logements neufs (à partir de 1997 jusqu'à encore maintenant) ;

La mise en place du document de référence ECODOM a pris deux années (de 1995 à 1997). Il a fallu tout d'abord identifier les parties du bâtiment à étudier. Notre démarche a ensuite consisté à étudier plusieurs logements représentatifs des habitudes locales de construction (logement individuel et collectif). Cette étude fut réalisée à l'aide d'un outil de simulation de comportement thermo-aéraulique de bâtiments [Boyer 98], développé à l'Université de La Réunion. Les simulations ont porté sur l'ensemble des éléments constitutifs de l'enveloppe (toiture, murs, fenêtres) et sur la ventilation naturelle de manière à estimer l'influence de chacune des prescriptions en terme de confort thermique et en terme de performance énergétique (voir figure 4). Les simulations, leur analyse et les résultats synthétisés sont présentés dans [Garde 99].

Les solutions passives ont ensuite été éditées dans un document de référence [Célaire 97] après de nombreuses concertations avec des groupes de travail locaux et nationaux (constitués d'architectes, d'universitaires et de professionnels du bâtiment) sur l'aspect pédagogique et sur la mise en forme des résultats. Ce document sert depuis 1997 de base de travail pour la conception des nouvelles opérations de logements neufs dans les DOM.

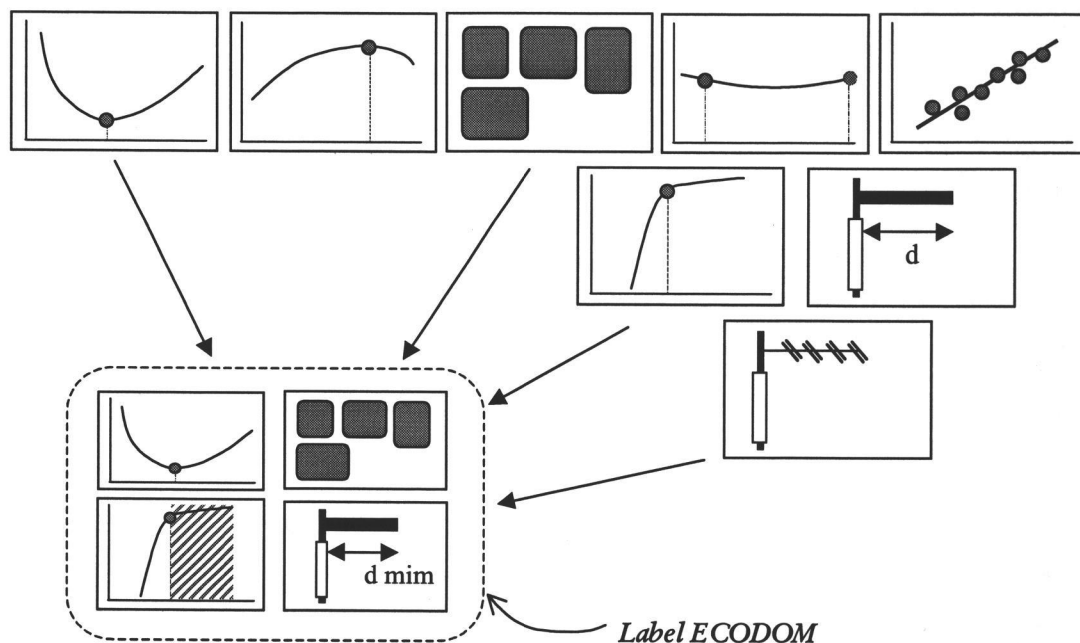


Fig. 4. : Principe de l'élaboration du label ECODOM. A partir des règles expertes disponibles (règles de tendances, règles de choix technologiques, règles de valeurs limites, . . .), on fixe certains choix et on définit des seuils de paramètres. L'ensemble des règles prescrites forme le label.

## 6 Quelques prescriptions issues du document de référence [Célaire 97]

Le document de référence ECODOM comprend cinq parties, chacune présentant les prescriptions pour une partie du bâtiment, de son environnement ou des systèmes associés :

1. Implantation sur le site (protection végétale obligatoire sur la périphérie du bâtiment) ;
2. Protection solaire de la toiture, des murs et des ouvertures;
3. Ventilation naturelle (dimensionnement des ouvrants extérieurs et agencement intérieur) ;
4. Eau chaude sanitaire (eau chaude solaire, gaz ou stockage électrique asservi autorisés) ;
5. Option chambre climatisée (bonne gestion de l'air neuf et du système de climatisation).

Pour chacune de ces parties, un choix de solutions techniques simples est proposé à l'architecte ou au bureau d'étude en charge de l'analyse du projet. Par exemple, le tableau 1 permet d'avoir l'isolation thermique optimale adaptée à la couleur de la toiture choisie.

Pour la protection solaire des ouvertures, le tableau 2 donne les dimensions du débord requis en fonction de l'orientation des ouvertures et des caractéristiques géométriques. D'autres solutions de protections (volets persiennés, jalousies opaques) sont évidemment autorisées.

De même, la protection solaire des murs peut être assurée par débord ou isolation thermique. Des tableaux fournissent les épaisseurs d'isolant requises en fonction du type de matériau utilisé, de l'orientation de la paroi et de sa couleur.

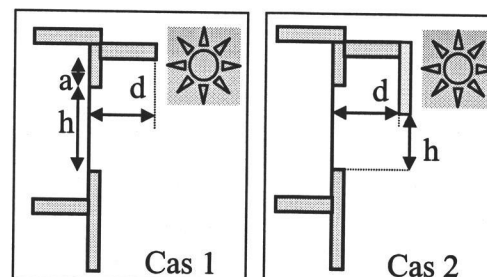
Pour la ventilation naturelle, il est demandé que le logement soit entièrement traversant : à chaque niveau ou étage, il doit posséder des ouvertures dans les pièces principales sur au moins deux façades opposées (les pièces principales étant les chambres et le séjour). Le calcul de la porosité ECODOM s'effectue en faisant la moyenne de la surface des deux façades opposées. Les ouvertures de deux façades ainsi que les ouvertures intérieures doivent avoir une surface au moins égale à 25% de cette moyenne.

| Couleur toiture            | Isolant type polystyrène<br>$\lambda = 0,041 \text{ W/m.K}$ | Isolant type polyuréthane<br>$\lambda = 0,029 \text{ W/m.K}$ |
|----------------------------|---|--|
| claire ( $\alpha = 0,4$ )  | 5 cm  | 4 cm   |
| moyenne ( $\alpha = 0,6$ ) | 8 cm  | 6 cm   |
| foncée ( $\alpha = 0,8$ )  | 10 cm   | 8 cm   |

Tableau 1 : Epaisseur d'isolant requise (en cm) en fonction de la couleur de toiture

|            | Orientation |     |       |      |
|------------|-------------|-----|-------|------|
|            | Est         | Sud | Ouest | Nord |
| Réunion    | 0,8         | 0,3 | 1     | 0,6  |
| Guadeloupe | 0,8         | 0,6 | 1     | 0,3  |

Tableau 2 : valeurs de  $d/(2a+h)$  (cas 1), or  $d/h$  (cas 2)



## 7 Illustration d'une collaboration réussie entre architecte et thermicien grâce au document ECODOM : le projet « Phénix »

Nous allons présenter dans cette partie l'étude de l'opération « Phénix » qui est une opération 100 % ECODOM. Il est à noter que la méthode de travail présentée dans cette partie est appliquée à tous les projets ECODOM.

Le projet « PHENIX » est situé dans la partie Nord-Est de l'île de La Réunion qui est une zone dont les sollicitations climatiques sont très extrêmes (ensoleillement important, température élevée et vent faible). Il s'agit de 66 logements locatifs sociaux. Le projet se divise en deux gros blocs de bâtiments (voir figure 6). Les bâtiments de A à F sont à deux ou trois étages. Les bâtiments de G à J sont en R+1. Les premiers travaux d'étude ont débuté en début d'année 1999. Le chantier s'est terminé en juin 2001.

### 7.1 Phase esquisse

Il s'agit ici de notre premier contact avec l'architecte, et le maître d'ouvrage. Les grands principes du document de travail sont exposés (végétalisation périphérique pour l'environnement du bâtiment, protection solaire de la toiture et des façades, ventilation naturelle et bâtiments traversants). Lors de cette première réunion, le plan masse du projet est analysé et des modifications sont proposées. Sur la figure 4, la végétalisation est déjà positionnée pour protéger les façades qui seront directement exposées au rayonnement solaire.

### 7.2 Phase APS

Cette deuxième phase avec l'architecte permet de travailler sur les cellules d'habitation. L'architecte nous expose les plans des cellules d'habitation. A ce stade d'étude, les logements sont identifiés par typologie (T2, T3, T4, T5). Pour chaque type de logement les calculs de porosité sont effectués durant cette première réunion à l'aide du document de travail (25% de la moyenne de deux façades extérieures) afin de dimensionner les ouvertures extérieures. L'architecte connaît ainsi les surfaces à prévoir pour assurer une bonne ventilation des logements et réfléchir au choix des solutions qui devront être retenues. Les différents choix de protection solaire pour les baies sont exposés, mais le dimensionnement n'est pas effectué à ce stade.

### 7.3 Phase APD

Cette troisième réunion permet d'itérer et de valider les calculs réalisés en phase APS. Pour chaque type de logement, une fiche de calcul telle que représentée par la figure 5 est réalisée par l'architecte. Les calculs de porosité et les choix techniques de menuiseries sont validés par le thermicien et l'architecte. Dans l'exemple de la figure 5, il s'agit d'un logement de type T3, c'est à dire constitué d'un séjour et de deux chambres. La porosité du logement doit être de 2.81 m<sup>2</sup> sur chaque façade. Côté séjour, celle-ci est assurée par une porte-fenêtre coulissante trois vantaux, et côté chambre, deux menuiseries de type jalousie assurent une porosité de 1.41 m<sup>2</sup> chacune, soit 2.82 m<sup>2</sup> pour la façade. Les protections solaires des menuiseries sont également dimensionnées durant

cette phase. Côté séjour, la protection est assurée par les varangues, et côté chambres, celle-ci est assurée par un refend en béton et par des lames opaques intégrées à la menuiserie. Au niveau de l'architecture intérieure, le positionnement des portes est étudié de manière à optimiser l'écoulement de l'air. L'architecte essaye de les positionner perpendiculairement à l'écoulement. On vérifie également que la porosité est bien respectée à l'intérieur du logement. Dans notre exemple, les portes des chambres ont une surface de 1.6 m<sup>2</sup> chacune, ce qui donne une porosité intérieure de 3.2 m<sup>2</sup>, ce qui est supérieur à la porosité exigée. On peut retrouver une fiche analogue à celle de la figure 5 pour tous les types de logements de cette opération.

L'architecte affine également le travail sur les façades. La collaboration avec le thermicien permet d'intégrer des jeux de couleur sur les façades à partir du moment où celles-ci disposent d'une protection solaire efficace (voir figure 6).

La phase APD est extrêmement importante car l'architecte n'a plus le droit de modifier l'architecture de ses façades une fois le permis de construire déposé. Les solutions techniques permettant d'atteindre les exigences ECODOM doivent donc être décidées durant cette phase.

## 7.4 DCE

Durant cette phase, nous avons effectué un rapport d'analyse du projet global [16]. Ce rapport fait la synthèse des réunions de travail en phase APS et APD. Il reprend l'ensemble des cinq parties du document de référence et valide la conformité du projet par rapport aux exigences ECODOM.

## 7.5 Phase chantier - réalisation

Le suivi de chantier est assuré par Promotelec, organisme français chargé normalement de vérifier la conformité des installations électriques. Dans le cadre du partenariat entre les différents acteurs du bâtiment, cet organisme s'engage à vérifier également la conformité du projet aux spécifications ECODOM.

Grâce au rapport d'analyse établi en phase DCE, la personne responsable du suivi de chantier peut vérifier en collaboration avec le thermicien le respect des solutions techniques et ainsi valider à la fin du chantier ce qui a été établi en phase étude. Comme le montrent les figures 7 et 8, on retrouve les protections solaires par varangue, les jalousies toute hauteur pour les chambres avec des lames opaques sur la partie basse. Les refends verticaux assurent par ailleurs la protection solaire telle qu'elle avait été dimensionnée en phase étude. Les pignons exposés sont isolés thermiquement avec un doublage intérieur en polystyrène.

Ainsi, grâce à une collaboration efficace entre l'architecte et le physicien et à l'utilisation du document de référence, nous voyons que le projet peut être suivi de manière efficace de la phase esquisse jusqu'à la réception des travaux. Cette méthode de travail garantit non seulement la conformité de l'ensemble des logements par rapport aux critères ECODOM mais également permet de produire un projet esthétiquement réussi avec un travail sur les couleurs de façades et sur la végétalisation des espaces.

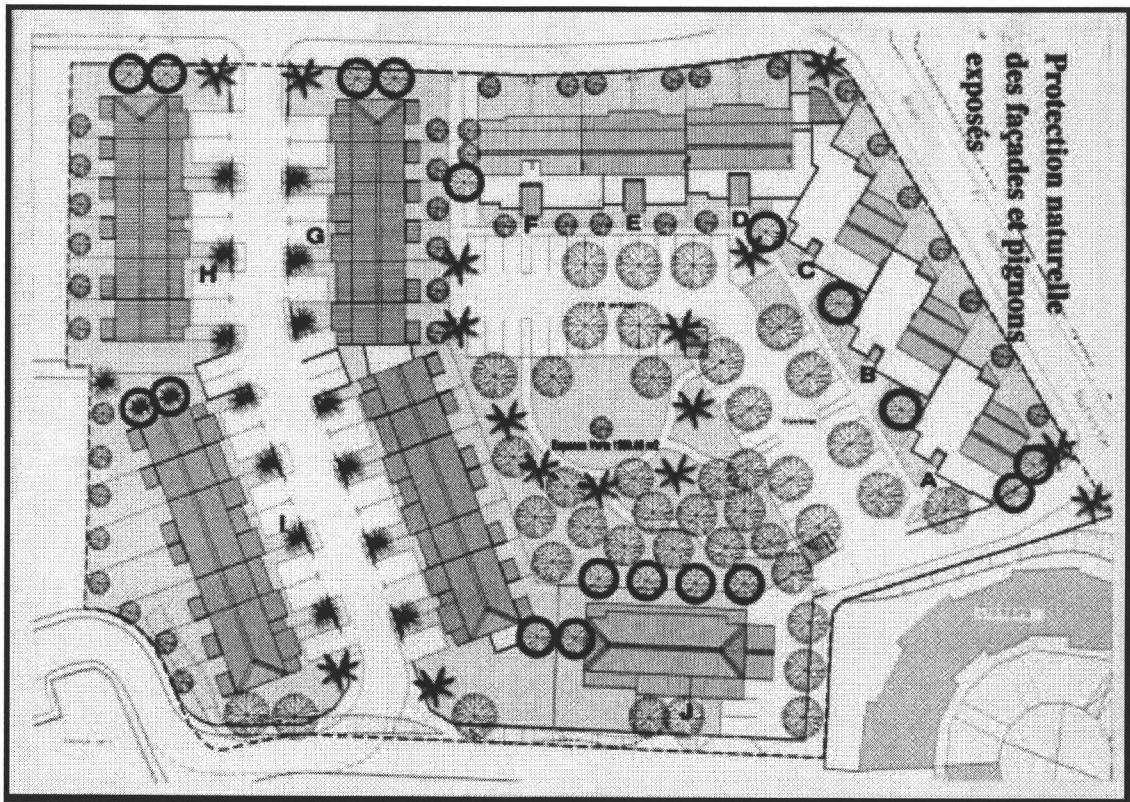


Fig. 5 : Plan masse de l'opération Hibiscus. Définition des grands principes ECODOM en phase esquisse. Définition des protections solaires en fonction de l'orientation des bâtiments, végétalisation.

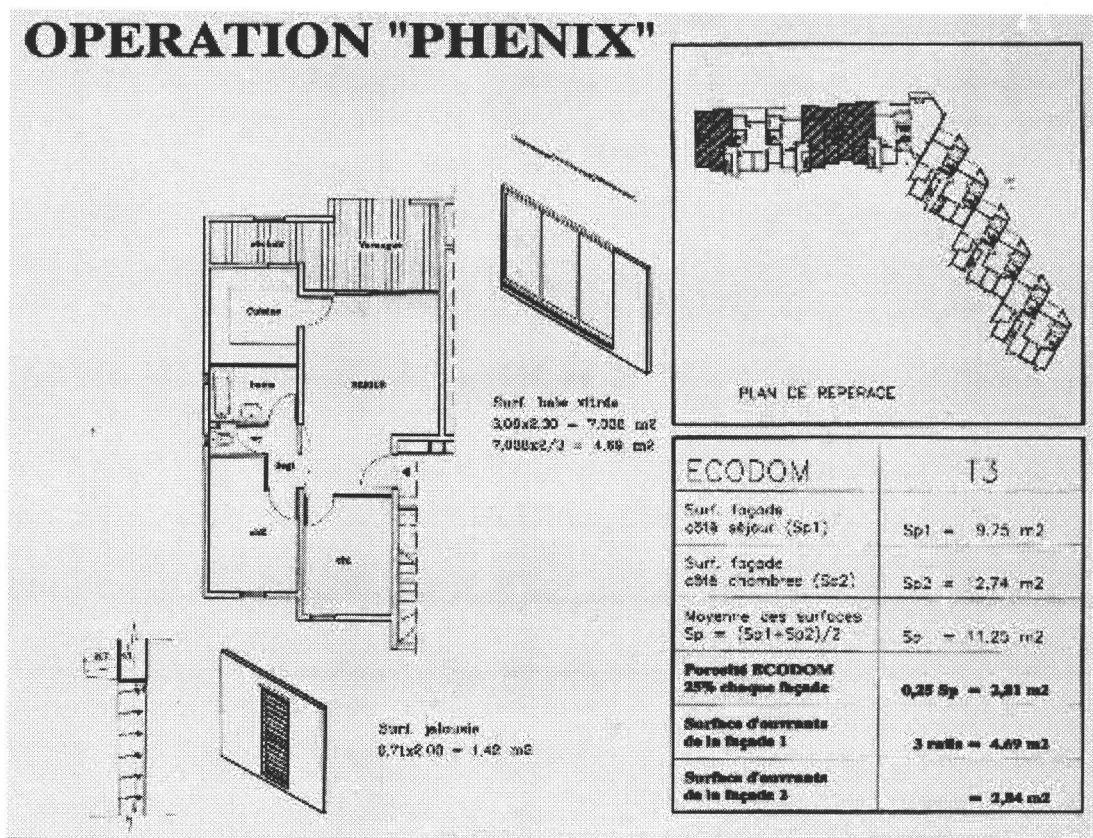


Fig. 6 : Exemple de fiche de calcul ECODOM établie entre l'architecte et le thermicien en phase APS. Itérations jusqu'en phase APD

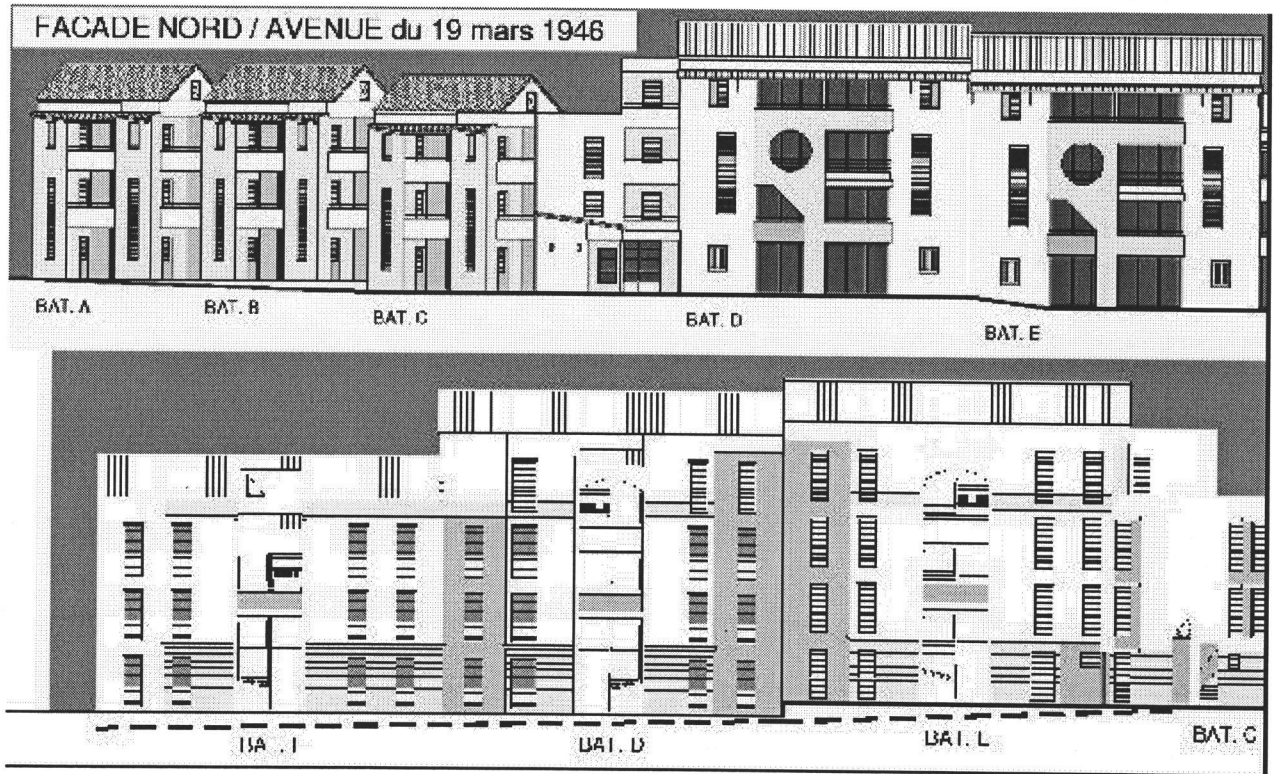


Fig. 7 : Façades Nord Est (haut) et Sud-ouest (bas). Phase APD. L'architecte peut colorer les façades qui disposent d'une bonne protection solaire.

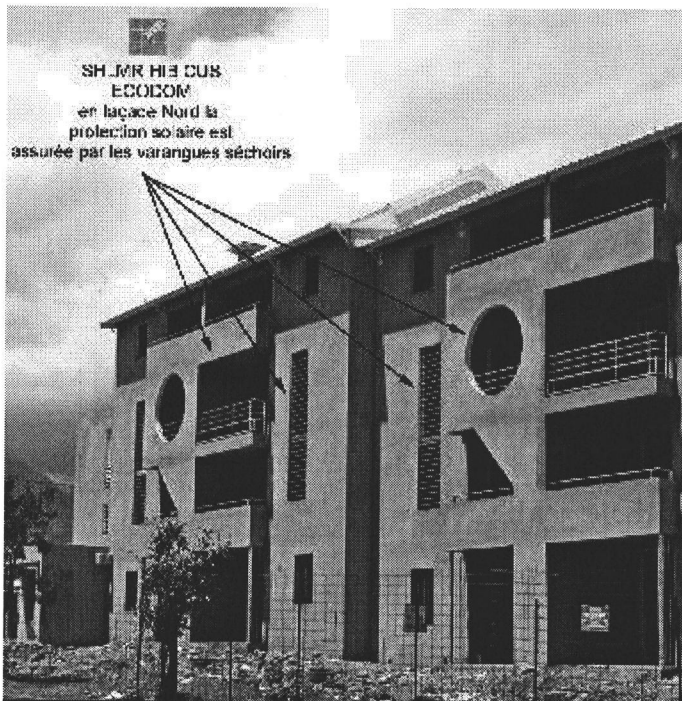


Fig. 8 : Façade Nord, Bâtiments D, E et F. La protection solaire des baies du séjour est assurée par les varangues qui servent d'espace tampon

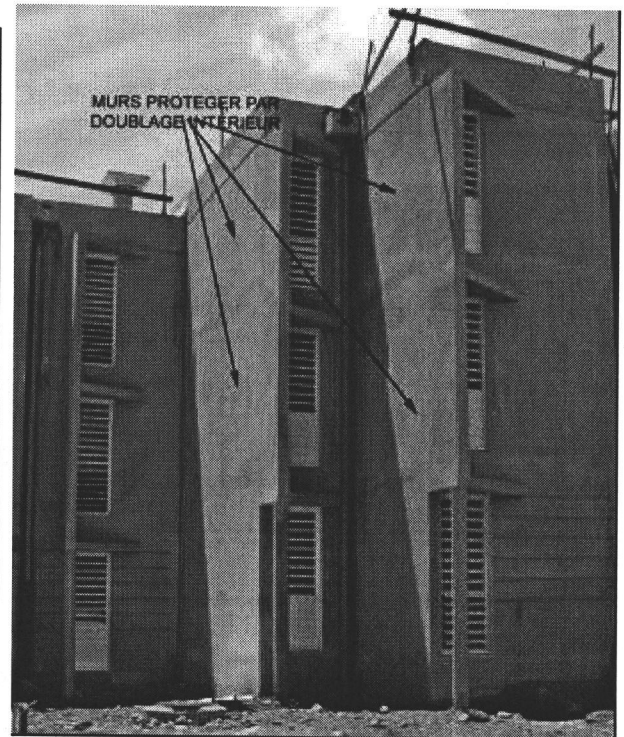


Fig. 9 : Façade Sud-Ouest des Bâtiments A, B, C. La protection solaire des pignons est assurée par 2 cm de polystyrène, celle des baies par les refends en béton. La ventilation naturelle est assurée par des jalousies de 1.50 m<sup>2</sup>

## 8 Bilan de la période 1997-2001

Depuis 1997, plus de 800 logements ont été réalisés dans les DOM en utilisant le document ECODOM. La majeure partie de ces logements sont des logements sociaux. L'ensemble des projets étudiés en collaboration avec l'architecte dès la phase esquisse ont permis d'avoir 100% des logements conformes aux prescriptions ECODOM. L'expérience des cinq dernières années fait apparaître plusieurs constats. L'un d'entre eux est que l'utilisation d'un outil tel que le document de référence ECODOM a permis de nouer un dialogue fort entre architectes, thermiciens et maîtres d'ouvrage en ce qui concerne la thermique du bâtiment. Le nombre de projets « ECODOM » réalisés montre que la méthode que nous appliquons fonctionne bien. Enfin, à l'issue de la période 1997-2001, nous pouvons dresser un bilan sur les modifications générales portant sur l'architecture intérieure et extérieure des bâtiments

### 8.1 Impact sur l'architecture

D'une manière générale, les nouvelles opérations réalisées à l'aide du document de référence ECODOM n'ont pas fait apparaître d'impossibilité technique. Lorsque le projet est pris très tôt, l'implantation sur le site ne pose pas de problème et la végétalisation périphérique exigée par ECODOM est facilement réalisable. En ce qui concerne la protection solaire de la toiture, on retrouve souvent dans les projets l'utilisation d'isolants classiques type polystyrène ou mousse de polyuréthane. La protection des murs est souvent assurée par l'isolation thermique des pignons par doublage intérieur (la solution protection par auvent se voit très rarement car celle-ci est coûteuse).

Le problème majeur en phase étude provient de la protection solaire des ouvertures et de la ventilation naturelle. En effet, il s'agit d'avoir une menuiserie qui empêche le rayonnement solaire de pénétrer dans le logement tout en garantissant une bonne ventilation naturelle. A La Réunion, le manque de produits adaptés au climat tropical en terme de menuiseries couplés aux exigences des bureaux de contrôle et des assurances pour la protection cyclonique conduisent souvent à des points de blocages pour la ventilation naturelle. Ceci rend difficile une conformité ECODOM. Le problème est facilement résolu pour la zone « séjour » car la varangue (espace tampon issu de la tradition créole) assure la protection solaire de la baie du séjour. Pour garantir une bonne ventilation, l'ouverture est souvent une porte-fenêtre (comme le montre la figure 9) ou une porte fenêtre coulissante à 3 vantaux (voir figure 5).

En ce qui concerne les chambres, le calcul de la porosité ECODOM donne souvent des valeurs comprises entre  $1.6\text{m}^2$  et  $2\text{m}^2$  (or, la surface moyenne d'une menuiserie standard est de  $1\text{m}^2$ ). Ce type de menuiserie ne se trouve pas actuellement sur le marché réunionnais. Nous avons donc travaillé en collaboration avec l'architecte sur de nouveaux type de menuiseries afin d'atteindre les valeurs exigées. Ainsi, sur les projets ECODOM, nous retrouvons en général des menuiseries de type jalousie toute hauteur (voir figure 8) ou bien des menuiseries « hybrides » constituées d'une fenêtre « standard » couplée à des jalousies opaques (voir figure 9). La protection solaire des fenêtres est assurée par des volets persiennés.



Concernant l'agencement intérieur, les portes de communication (qui ont une porosité de 1.6 m<sup>2</sup>) sont la plupart du temps dotées d'impostes afin de garantir une ventilation permanente dans le logement et d'augmenter la porosité à 2 m<sup>2</sup>. L'ensemble des pièces de vie est équipé d'attentes électrique spécifiques à l'installation d'un brasseur d'air. Par ailleurs, toutes les portes sont équipées d'un système de blocage qui garantit l'écoulement de l'air dans le logement.

Enfin, le surcoût moyen dû à la mise en place d'ECODOM est estimé à 1500 euros par logement sur les cinq dernières années, soit 3% environ du coût total du logement. Ce surcoût provient essentiellement du poste menuiserie.



Fig. 10 : Apparition de nouvelles menuiseries (fenêtres + jalousies) sur les nouveaux projets pour augmenter la ventilation naturelle

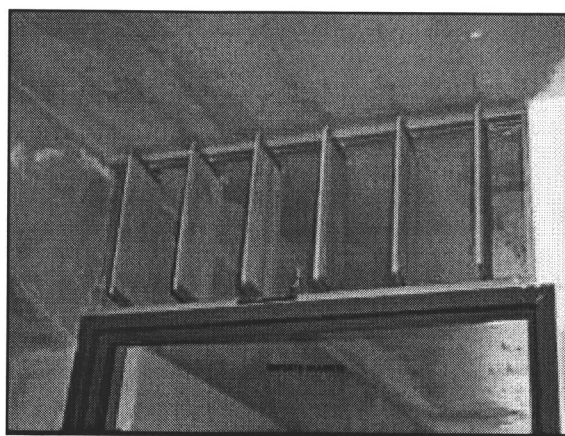


Fig. 11 : Impostes au dessus des portes afin d'améliorer la ventilation intérieure du logement

## 8.2 Validation et retour d'expérience

Un suivi expérimental et sociologique a été mis en place pour les deux premières opérations ECODOM. Il s'agissait d'avoir un retour d'expérience rapide afin de faire les corrections nécessaires sur le document de référence. Les campagnes de mesures ont été réalisées pendant les saisons chaudes de 1998 et 1999. Elles ont porté à la fois sur des logements non occupés et sur des logements occupés

Le suivi expérimental a mis en évidence l'importance de la protection solaire de la toiture, des baies et de la ventilation naturelle. Les résultats ont déjà fait l'objet de publication [Garde 01a], [Garde 01b], aussi, nous ne nous étendrons pas sur ce point.

L'enquête sociologique nous a permis de confirmer certains résultats du suivi expérimental, notamment sur la protection solaire de la toiture et de la ventilation naturelle. Concernant la ventilation naturelle, les locataires ont apprécié largement la ventilation traversante malgré les nuisances sonores principalement dues à la dualité confort acoustique/confort thermique d'un logement ouvert. La possibilité de pouvoir réguler les flux d'air à l'aide de jalousies extérieures a été très bien perçue. Ainsi, l'amélioration de la conception thermique d'un logement peut se faire en proposant des solutions passives efficaces et (c'est sans doute le plus important), qui sont en harmonie avec le mode d'habiter des occupants.

## 9 Conclusion

Nous avons présenté les travaux de collaboration entre architectes et thermiciens du bâtiment mis en place depuis 5 ans pour la conception thermique des logements en climat tropical. Cette collaboration s'appuie sur un outil simple et pédagogique élaboré à partir de codes détaillés. Le type de support utilisé (document papier de 30 pages) garantit non seulement la diffusion de la connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles mais également la facilité d'utilisation et la communication entre acteurs du bâtiment lors de l'élaboration de nouveaux projets.

La collaboration entre architecte et thermicien s'étend actuellement à d'autres projets de construction, notamment la réhabilitation de logements anciens. Ainsi, plus de 120 logements ont été réhabilités en suivant la même méthode de travail.

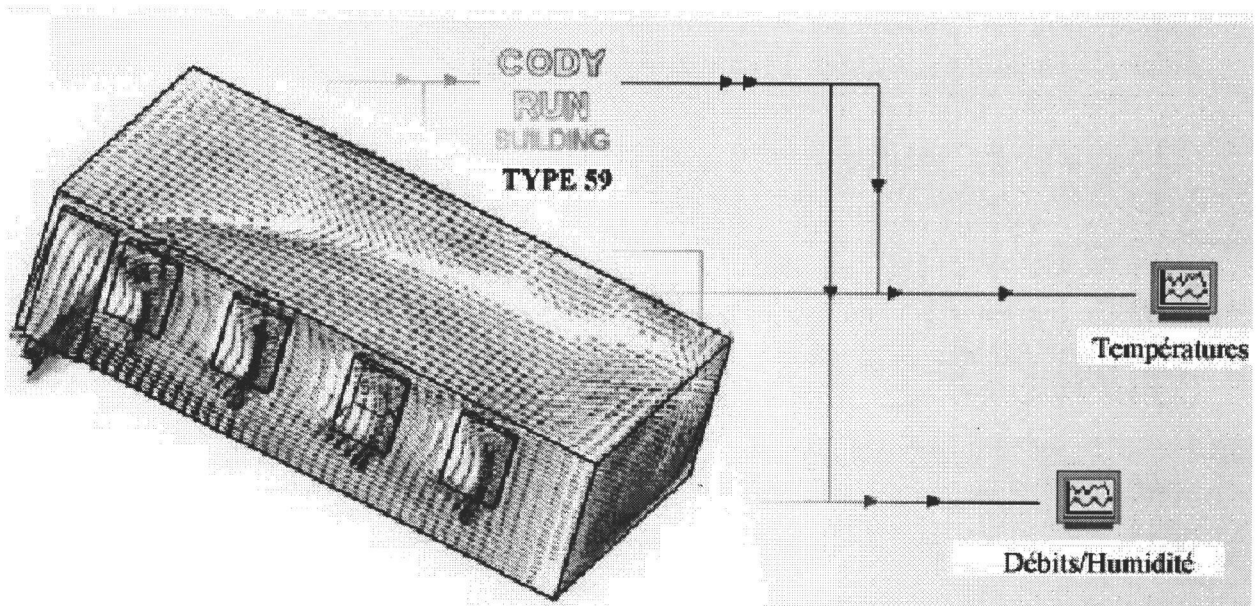
Par ailleurs, le document de référence ECODOM est intégré dans le programme de construction de nouveaux lycées et sert de base de travail pour la conception de salles de classe d'établissement scolaires.

On assiste donc depuis quelques mois à une diffusion progressive du savoir chez les maîtres d'ouvrage et les architectes et à une prise de conscience générale des questions relatives à la thermique du bâtiment. La principale raison de ce succès vient une fois de plus de la simplicité et de la pédagogie de l'outil.

Ainsi, nous voyons qu'avec les outils appropriés, la communication entre l'architecte et le thermicien se trouve améliorée. Il en résulte une meilleure approche de l'acte de construire, une approche plus globale permettant de réaliser des bâtiments plus confortables, adaptés au climat, économes en énergie et respectant le mode de vie de nos concitoyens.

## Chapitre 5

# Perspectives



*De part notre approche pluridisciplinaire et une bonne maîtrise des problématiques liés au bâtiment et à l'environnement, les perspectives sont étendues. A court et moyen terme, les thèmes ont trait à la modélisation détaillée en thermique des bâtiments et des systèmes associés ainsi qu'à la validation de tels modèles. La modélisation d'indices de confort thermique spécifiques à nos climats, leur intégration à des codes de simulation et leur validation est également en cours. En terme de disciplines, les compétences spécifiques que nous développons actuellement sont celles de la mécanique des fluides appliquée aux écoulements dans l'habitat, de l'instrumentation spécifique et des énergies renouvelables appliquées au bâtiment.*

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Amélioration des enveloppes de bâtiments en climatisation naturelle et étude du confort thermique .....</b>                                  | <b>141</b> |
| 1.1      | Contexte général : .....  | 141        |
| 1.2      | Amélioration du confort thermique dans les salles de classe : .....   | 141        |
| 1.3      | Utilisation de codes de mécanique des fluides pour améliorer la prédiction des vitesses d'air dans les bâtiments ventilés naturellement : ..... | 142        |
| 1.4      | Amélioration de la prise en compte des phénomènes d'humidité.....   | 144        |
| <b>2</b> | <b>Les énergies renouvelables et la thermique du bâtiment .....</b>   | <b>145</b> |
| 2.1      | Potentiel climatique de la Réunion .....  | 145        |
| 2.2      | Systèmes de climatisation solaire.....  | 145        |
| 2.3      | Système de production d'énergie solaire thermique .....   | 146        |
| 2.4      | Les capteurs .....  | 146        |
| 2.5      | Eolien.....   | 146        |
| 2.6      | Modélisation et validation des enveloppes et des systèmes associés .....  | 147        |

# 1 Amélioration des enveloppes de bâtiments en climatisation naturelle et étude du confort thermique

## 1.1 Contexte général :

En climat tropical humide, la température de l'air et surtout l'humidité élevée sont les sources principales d'inconfort. L'homme qui habite dans des régions à climat tropical humide depuis des temps très anciens a réussi progressivement à maîtriser ces conditions climatiques difficiles en construisant une architecture traditionnelle adaptée.

Cependant, les contraintes urbanistiques et économiques contemporaines, l'introduction de nouveaux matériaux et d'une architecture importée de métropole conduisent à avoir une réflexion globale sur le confort thermique en climat tropical. Cette réflexion concerne aussi bien le secteur du logement que celui de l'éducation nationale puisque les contraintes énergétiques fortes (moyens de production de l'électricité limités couplés à un coût de production élevé) conduisent à limiter autant que possible le développement de la climatisation.

L'optimisation du confort dans une pièce ou une salle de classe repose sur l'optimisation des paramètres tels que la ventilation naturelle ou la température résultante. Autant il est facile pour le premier de limiter ses effets en optimisant la protection solaire de la toiture et des baies et fenêtres, autant il est difficile pour le second d'avoir une idée de la vitesse moyenne de l'air dans une pièce car le nombre de paramètres influents est très important.

Par ailleurs, les indices de confort proposés dans la bibliographie sont nombreux et ne sont pas tous adaptés au climat tropical. Il s'agit donc de trouver l'indice le plus approprié aux conditions climatiques locales de La Réunion.

Ce travail de recherche s'intègre donc dans une démarche globale d'amélioration des bâtiments en climat tropical humide sans avoir recours à la climatisation active.

## 1.2 Amélioration du confort thermique dans les salles de classe :

Ce travail de recherche consiste à définir un indice local représentant la sensation de confort thermique d'un individu dans une ambiance donnée. Cet indice permettra par exemple de prédire la sensation thermique des étudiants dans les nouveaux projets de lycées.

La sensation de confort thermique d'un individu dépend de plusieurs paramètres :

- Température de l'air ;
- Température radiante moyenne (moyenne de la températures de surface des parois de la pièce étudiée) ;
- Humidité ;
- Vitesse de l'air ;
- L'activité de l'individu ;
- L'habillement de l'individu.

De nombreux indices de confort thermique existent tels que le PMV, mais ne sont pas adaptés au climat tropical.

Les objectifs de ce travail de recherche sont de :

- Recenser les indices de confort existants dans la bibliographie (PMV, SET, Gagge, DISC) et les comparer pour différentes ambiances simulées ;
- Proposer un indice adapté au climat tropical humide (zone des bas de La Réunion) ;
- Intégrer l'indice aux codes de simulation CODYRUN et TRNSYS ;
- Proposer une méthodologie de validation expérimentale de l'indice de confort. En effet, il serait intéressant de comparer cet indice avec les votes expérimentaux pour plusieurs gammes de variation de vitesse d'air et de déterminer finement des seuils de vitesse vis à vis de la sensation de confort.

Nous avons à ce sujet déjà commencé à faire des instrumentations dans des salles de TD à l'IUT (voir figure 8) sur le confort thermique des étudiants.

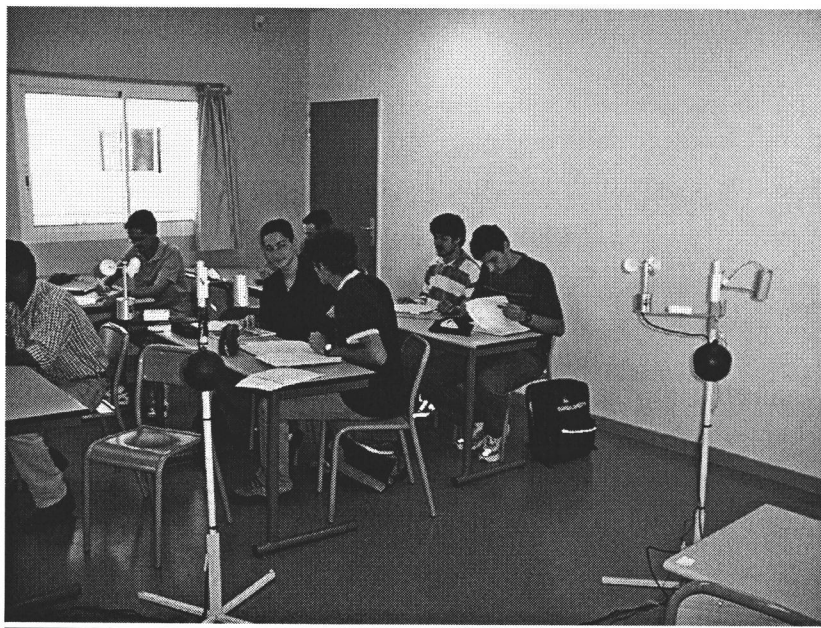


Figure 1 : Etude expérimentale du confort thermique dans une salle de TD, IUT de Saint-Pierre

### 1.3 Utilisation de codes de mécanique des fluides pour améliorer la prédiction des vitesses d'air dans les bâtiments ventilés naturellement :

Des outils de simulation existent et permettent de simuler le comportement thermo-aérodynamique des bâtiments en régime dynamique. Par contre, ces outils ne permettent pas de connaître une vitesse d'air moyenne dans les pièces du bâtiment simulé. Nous avons vu que la connaissance d'un indice de confort nécessite impérativement la détermination de la vitesse d'air.

Une solution existe et consiste à utiliser un code CFD (Computational Fluid Dynamics) pour une étude fine du champ des vitesses dans la bâtiment. Il est ensuite possible de trouver des corrélations simples entre une vitesse de vent extérieure et une vitesse d'air moyenne à l'intérieur du logement.

Les objectifs de ce travail de recherche sont donc de :

Mettre en place une soufflerie numérique à l'aide d'un code CFD

Les méthodes pour déterminer le champ de vitesse intérieur nécessitent la mise en œuvre de moyens expérimentaux importants, que ce soit en soufflerie à couche limite ou avec des bâtiment à échelle 1 en site réel. Le soufflerie numérique présente l'avantage d'être peu coûteuse en investissement matériel.

Valider les résultats issus de la soufflerie avec des mesures réalisées sur une salle de classe type (cf. figure 8)

Utiliser la soufflerie numérique sur des configuration type de bâtiment pour la détermination du champ des vitesse d'air intérieures

Proposer des lois de corrélation entre la direction du vent et le coefficient de réduction de vitesse qui est défini par la relation suivante :

$$C_v = V/V_{\text{réf}}$$

Avec  $V$  : vitesse d'air intérieure

$V_{\text{réf}}$  : vitesse de référence dans la zone non perturbée

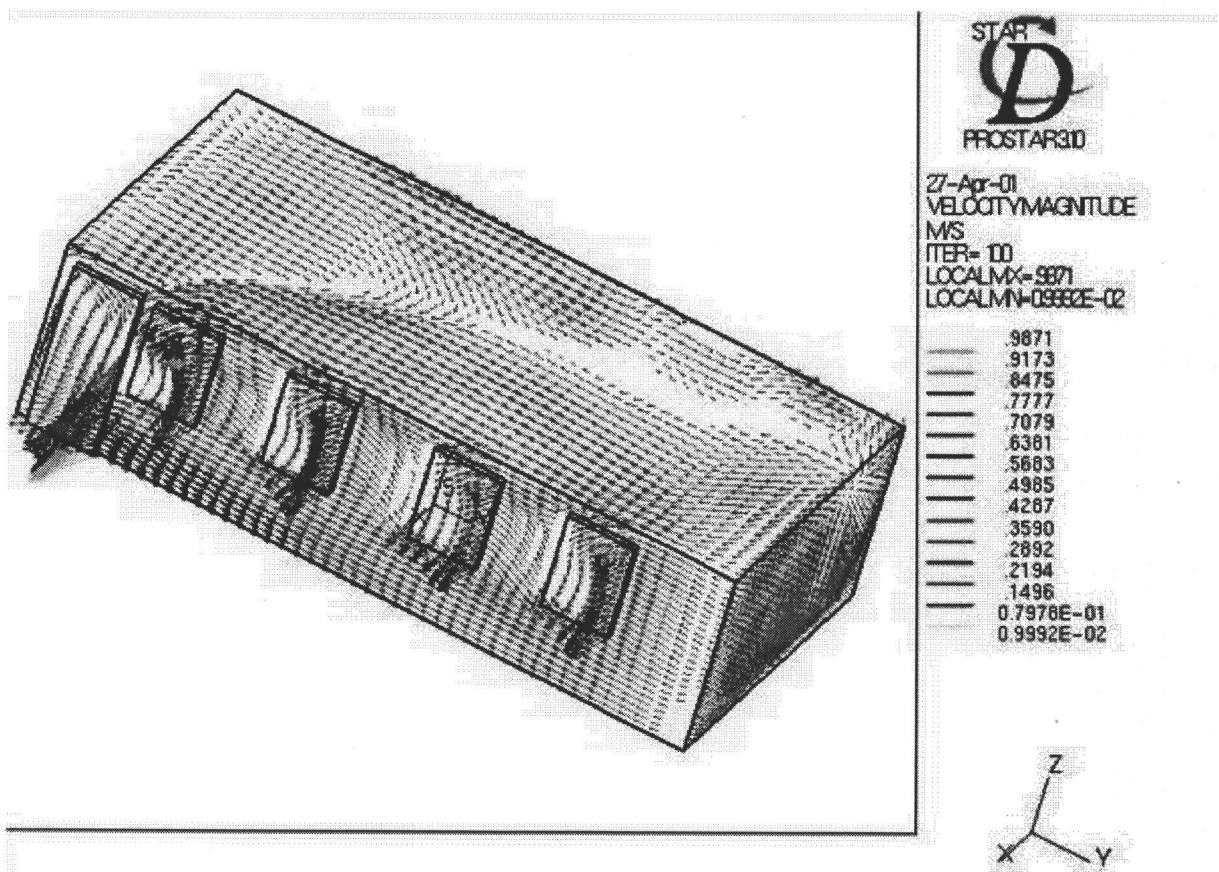


Figure 2 : Modélisation tridimensionnelle des écoulements dans une salle de TD, IUT de Saint-Pierre

## 1.4 Amélioration de la prise en compte des phénomènes d'humidité

Les phénomènes liés à l'humidité dans les bâtiments sont intégrés le plus souvent d'une façon très sommaire. Le plus souvent, seul est considéré le transport passif par les débits aérauliques. Des approches récentes en modélisation (tampon hygroscopique global, échanges surfaciques au niveau des parois, ...) et la possibilité de conduire localement des expérimentations spécifiques à nos climats et modes constructifs plaident dans le sens d'une meilleure intégration des phénomènes liés à l'humidité (condensation, ...).

Sous notre climat tropical et humide et de par la multitude de microclimats rencontrés (zone des hauts par exemple), ces aspects dépassent le seul cadre du confort, la mauvaise gestion de l'humidité s'accompagnant de désordres importants au niveau du bâti, qu'il s'agisse du développement de moisissures ou de corrosion des armatures métalliques de l'ouvrage. Une première approche est actuellement en cours au travers d'une thèse de doctorat dont la soutenance est prévue fin 2001.

Il est à noter que cette préoccupation tire sa source d'un contrat d'expertise mené par l'équipe dans le cadre d'un contrat avec un Maître d'Ouvrage.

L'objet du travail en cours est d'améliorer la prise en compte des échanges enveloppe/air humide au travers d'une procédure détaillée. Les coefficients intervenant dans ce type modèle dépendent bien sur des matériaux et du traitement de surface (surface brute, peinte, ...). Une autre variable du modèle est la teneur en eau dans les couches profondes du matériau.

Au niveau de l'implémentation informatique, elle est prévue en deux temps :

- Tout d'abord au sein d'un code de simulation monozone sous MATLAB développé par T. MARA. Il s'agira d'intégrer à la partie hydrique les équations traduisant l'échange entre les parois intérieures et la masse d'air humide constituée par la zone. Cette partie permettra de mener une analyse de sensibilité détaillée.
- Ensuite, au sein du code de simulation hygro-thermo-aéraulique CODYRUN.

Au sein de l'équipe, cette partie de modélisation est menée en parallèle à une partie expérimentale (STA-TRON) permettant d'identifier les coefficients d'échange et de stockage pour des matériaux de construction locaux.



## 2 Les énergies renouvelables et la thermique du bâtiment

L'efficacité énergétique à l'échelle locale impose une prise en compte stricte des potentialités en matière d'énergies renouvelables. Ces potentialités sont fortes à la Réunion. L'énergie solaire est sans doute la source la plus impliquée dans la thermique du bâtiment. Elle peut intervenir en production de chaleur (chauffage d'eau chaude sanitaire, chauffage des locaux) ou en production de froid (systèmes de climatisation solaires). Pour étendre l'utilisation de tels systèmes, il est nécessaire d'en évaluer les performances et les caractéristiques.

### 2.1 Potentiel climatique de la Réunion

Les énergies renouvelables constituent un gisement non négligeable pour La Réunion. D'un point de vue climatique, les énergies éoliennes et solaires se distinguent.

L'énergie éolienne est peu utilisée actuellement sur l'île (uniquement sur le site le plus venteux de l'île, Sainte Marie, et pendant la saison sèche). En effet, la moyenne journalière de l'intensité du vent mesuré pendant la saison sèche est d'environ 6 m/s pour les sites les plus exposés. Toutefois, en fonction du relief, de nombreux micro-climats existent et peuvent disposer de meilleures conditions. Les conditions techniques de l'exploitation des éoliennes dépendent de l'intensité de vent nécessaire au démarrage de l'éolienne, et de l'intensité de vent nominale, donc de production énergétique optimale. Pour information, une éolienne de 5 m de diamètre par exemple produit 2 kW pour un vent de 6 m/s, pour une vitesse de démarrage de 4.5 m/s (source : documentation technique Vergnet S.A.). Des études techniques plus précises (diminution de la vitesse de démarrage, optimisation du rendement), permettant une adaptation des caractéristiques des éoliennes au milieu réunionnais seraient donc un préalable nécessaire à toute exploitation de cette énergie.

L'énergie solaire a connu un essor non négligeable, associé aux aides mises en place par le Conseil Régional, et l'Ademe. La Réunion dispose d'un gisement équivalent en moyenne à 6.5 kWh/jour/m<sup>2</sup> pour un site placé en littoral (au minimum 4.5 kWh/jour/m<sup>2</sup> en moyenne pour la saison sèche). Pour les « hauts de l'île », ce gisement est supérieur à 4kWh/jour/m<sup>2</sup>, avec un ensoleillement concentré en matinée. Une telle quantité d'énergie mise à disposition laisse présager des utilisations plus développées que celle des traditionnels chauffe-eaux solaires telle que l'utilisation de la climatisation solaire dont le développement sera explicité plus loin.

### 2.2 Systèmes de climatisation solaire

Le principal intérêt de ce système est que l'offre énergétique est simultanée au besoin, en ce qui concerne l'utilisation dans le secteur tertiaire. Différents systèmes de refroidissement solaire existent ; les climatiseurs à absorption (où le compresseur de l'installation classique est remplacé par un bouilleur solaire et un absorbeur), les systèmes de refroidissement par évaporation d'eau (l'énergie solaire est utilisée pour déshumidifier l'air avant traitement). Cependant ces installations ne font pas l'objet de suivie de performances énergétiques et ne peuvent dans ces conditions pas être optimisées en fonction du lieu d'utilisation. En effet, les

performances des installations dépendent fortement des conditions climatiques locales, elles nécessitent donc des études préalables afin de définir les conditions d'utilisation.

### 2.3 Système de production d'énergie solaire thermique

Ces systèmes sont déjà très répandus en production d'eau chaude sanitaire. Leur utilisation comme appoint de chauffage dans les hauts de l'île peut apporter une solution économique aux problèmes de confort et de condensation. Les habitations des « hauts » de l'île sont fortement dégradées par l'apparition de condensation sur les parois. Le moyen de lutte contre l'humidité dans les bâtiments est principalement la ventilation naturelle ou mécanique. Malheureusement celle-ci diminue la température intérieure et engendre des problèmes de confort. Il semble donc intéressant d'évaluer les performances réelles d'un système couplant la production d'eau chaude sanitaire avec un appoint de chauffage.

### 2.4 Les capteurs

Élément principal de l'installation, nous nous proposons d'évaluer différents capteurs en sites réels ou simulés, couplés ou non à des installations. Les pistes de recherches sont les suivantes :

- Nous souhaitons tester les possibilités de couplage entre un capteur photovoltaïque et une installation de climatisation classique (à compresseur).
- Le positionnement des capteurs est actuellement empirique. Il est nécessaire de mettre au point une méthodologie de positionnement tenant compte de la situation géographique, et des conditions météorologiques à l'échelle méso-climatique. Cette démarche a pour but, la création d'un outil logiciel basé sur l'utilisation de réseaux de neurones. Cet outil d'aide au positionnement serait destiné aux concepteurs et installateurs.
- Compte tenu du potentiel solaire de l'île, il est nécessaire d'évaluer l'intérêt de capteur à air caractérisé par une technologie très simple et un coût faible.
- Les capteurs à huile à haut rendement offrent des possibilités nouvelles compte tenu des températures obtenues. Nous souhaitons donc évaluer les performances de systèmes de climatisation solaires à absorptions couplés avec un tel capteur.

### 2.5 Eolien

La production d'énergie éolienne est caractérisée par une forte variabilité de la puissance. Cette forte variabilité peut poser problème lors de la connexion sur un réseau d'utilisation. Nous souhaitons donc :

- Améliorer le couplage de l'installation éolienne avec un bâtiment ;
- Gérer les crêtes de puissance ;
- Caractériser les potentiels éoliens de site.

## 2.6 Modélisation et validation des enveloppes et des systèmes associés

La modélisation et la validation des bâtiments et des systèmes peuvent se faire grâce aux outils développés au laboratoire. Les expérimentations doivent être étayer par une phase de simulations numériques permettant d'extrapoler le comportement des systèmes à des conditions de fonctionnement différentes. Codyrun et Runéole sont deux outils essentiels, développés au Laboratoire de Génie Industriel, permettant la simulation du comportement thermique de l'habitat et la génération de données climatiques. Dans un environnement modulaire tel que TRNSYS, ces outils permettront de modéliser tout système thermique en interaction avec un bâtiment. En effet, TRNSYS permet l'assemblage de modèles élémentaires représentant les composants d'un système thermique. De plus, dans cet environnement, il devient très facile de créer des composants spécifiques et de les intégrer dans un système plus complexe. Un exemple de simulation d'un logement équipé d'une production de chaleur solaire dans l'environnement TRNSYS est présenté ci-dessous.

Notre objectif est de simuler un bâtiment pilote équipé d'un système de climatisation solaire quelle que soit son implantation géographique sur l'île. Runéole générera des données climatiques pour divers sites sur l'île. Codyrun permettra de simuler le comportement du bâtiment à l'aide de modèles physiques spécifiques au climat tropical humide. Les modèles de systèmes thermiques de TRNSYS suivront l'évolution des paramètres de fonctionnement de l'installation de climatisation et ses performances. Cette modélisation sera suivie d'une phase expérimentale en site réelle permettant de valider les modèles utilisés et d'optimiser les paramètres de fonctionnement.

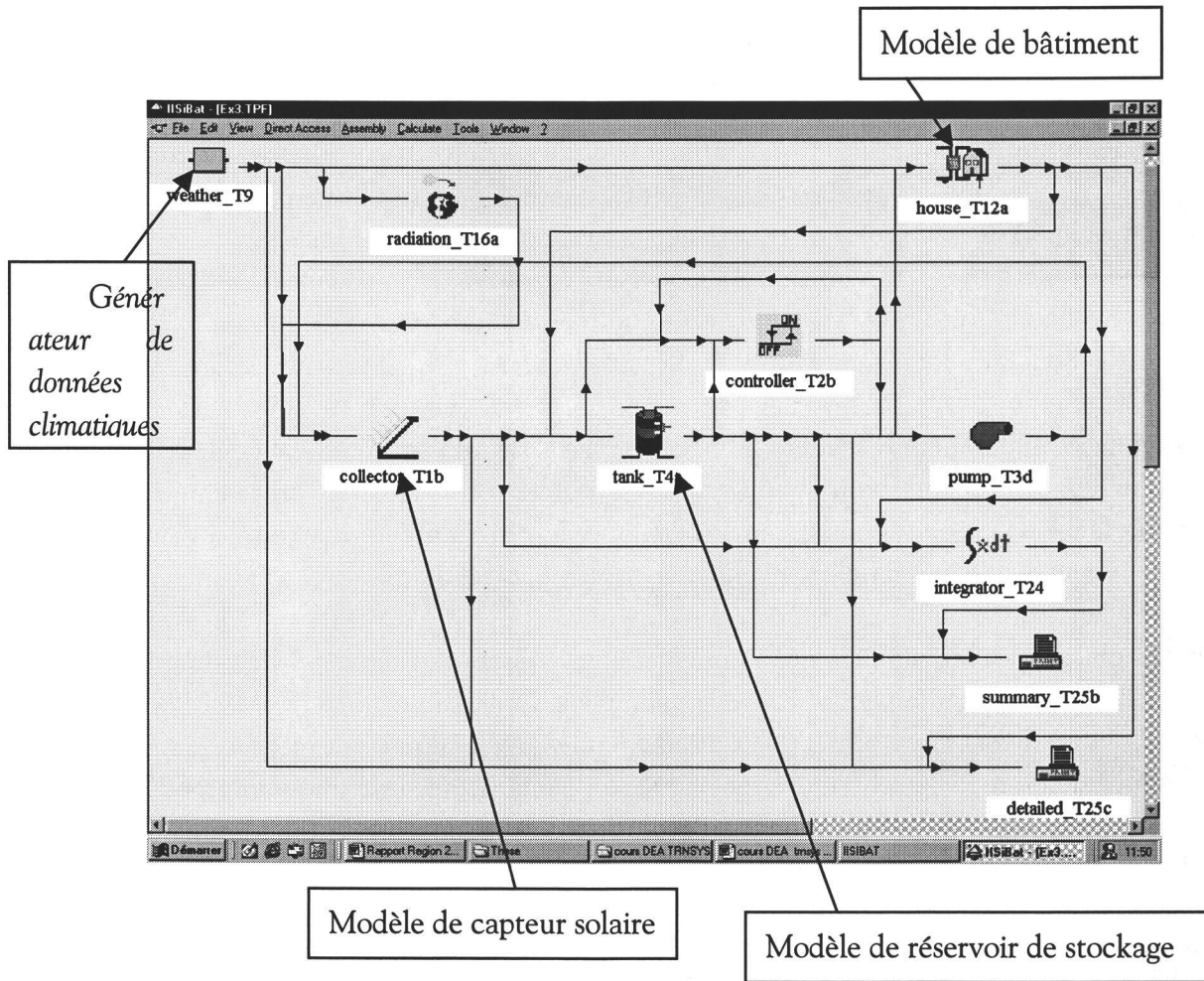


Figure 3 : Exemple de modélisation d'un capteur solaire sous l'environnement TRNSYS

# 3<sup>ème</sup> Partie

## Autres activités

Responsabilités administratives et  
pédagogiques

Relations internationales et industrielles

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Responsabilités administratives et/ou collectives .....</b>   | <b>151</b> |
| 1.1      | Mise en place et direction du département Génie Civil, I.U.T. de Saint-Pierre (1997-2000) .....  | 151        |
| 1.2      | Mandats électifs .....   | 154        |
| 1.3      | Chargé par le Président de l'Université de la maîtrise de l'énergie pour les nouveaux projets de bâtiments universitaires du C.P.E.R. ....       | 154        |
| 1.4      | Suivi scientifique et administratif de projets.....  | 155        |
| 1.5      | Mise en place de l'Opération expérimentale ECODOM (1994-1997) .....  | 157        |
| 1.6      | Intervention en assistance à maîtrise d'ouvrage sur les opérations de logement (neuf ou réhabilitation) et des bâtiments HQE (depuis 1997) ..... | 158        |
| <b>2</b> | <b>Relations nationales et internationales .....</b>   | <b>159</b> |
| 2.1      | Relations nationales.....  | 159        |
| 2.2      | Relations internationales .....  | 159        |
| <b>3</b> | <b>Relation avec le monde industriel .....</b>   | <b>161</b> |
| 3.1      | Partenaires institutionnels .....  | 161        |
| 3.2      | Maîtres d'ouvrage sociaux.....   | 162        |
| 3.3      | Partenaires professionnels.....  | 162        |
| <b>4</b> | <b>Activités d'enseignement .....</b>  | <b>163</b> |
| 4.1      | Enseignant en B.T.S. Equipement Technique et Energie option C « Froid et Climatisation » (1989 - 1990) .....                                     | 163        |
| 4.2      | Chargé d'enseignement à l'Université de la Réunion (1994 - 1997) .....   | 164        |
| 4.3      | A.T.E.R. à l'Université de la Réunion, département de Physique-Mécanique (1997-98) .....   | 164        |
| 4.4      | Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'I.U.T. de Saint-Pierre (Depuis 1998).....  | 165        |
| <b>5</b> | <b>Activités pédagogiques.....</b>   | <b>166</b> |
| 5.1      | Coordination et mise en place d'enseignements.....   | 166        |
| 5.2      | Publications liées à la pédagogie .....  | 167        |
| 5.3      | Habilitation de filières.....  | 167        |
| <b>6</b> | <b>Encadrement de stagiaires de deuxième cycle .....</b>   | <b>168</b> |
| 6.1      | Encadrement de DUMEE (Diplôme Universitaire de Maîtrise de L'Energie et de l'Environnement) .....  | 168        |
| 6.2      | Encadrement de stagiaires d'école d'ingénieur .....  | 169        |
| 6.3      | Encadrement de stagiaires de Maîtrise.....   | 169        |

# 1 Responsabilités administratives et/ou collectives

## 1.1 Mise en place et direction du département Génie Civil, I.U.T. de Saint-Pierre (1997-2000)

*Pendant l'année universitaire 1997-1998, j'ai été ATER au Département de Physique Mécanique de l'UFR Sciences et Technologies, Université de La Réunion. L'une de mes missions définies par le Département de Physique au niveau administratif a été la mise en place du département Génie Civil du nouvel I.U.T. de Saint-Pierre, Ile de La Réunion. Cette mission couvrait plusieurs aspects : le suivi de la construction de l'IUT proprement dite, mais également la préparation à l'ouverture du département (choix des équipements, organisation de l'environnement pédagogique) et la gestion financière du premier équipement. Une fois le bâtiment réceptionné, j'ai assuré pendant deux ans (1998-2000) les fonctions de Chef de Département pour assurer la mise en place des deux années de DUT.*

### 1.1.1 Création du département (1997-98)

#### Construction du bâtiment de l'IUT :

Cette phase est très importante car elle conditionne le bon fonctionnement du bâtiment lors de sa réception. Il s'agit donc d'être en étroite relation avec l'équipe de maîtrise d'œuvre (architecte et bureaux d'études) et de faire les modifications nécessaires au bon moment au regard de la fonctionnalité du bâtiment et de l'avancement du chantier. Les tâches durant cette phase étaient principalement :

- suivi du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) et de sa compatibilité avec le programme initial ;
- participation aux réunions de chantier de l'I.U.T. en tant que représentant de l'Université ;
- suivi de la cohérence entre les équipements de l'IUT et les équipements prévus dans le marché ;
- signalement des modifications en cours de chantier et des réservations nécessaires pour les équipements du département ;
- dimensionnement, suivi technique et administratif du pont roulant de la halle d'essai : le pont roulant, *équipement indispensable au fonctionnement du département Génie Civil, a nécessité une étude spécifique (dimensionnement de la charge maximale, implantation dans la halle d'essai passation de marché). Il a fallu également assurer le suivi de chantier en parallèle au chantier du bâtiment (réservations pour les ancrages des poteaux etc..)*

#### Définition des équipements :

Le choix des équipements suppose de connaître l'ensemble des matières enseignées dans un I.U.T. de Génie Civil. Cela implique d'avoir une vision globale des enseignements et la connaissance de la maquette pédagogique pour pouvoir commander les équipements adéquats. En parallèle au suivi de chantier, j'ai donc du

rapidement identifier les équipements et leurs achats par ordre de priorité et également voir si leur emplacement, leur taille et leur poids étaient compatibles avec le programme de construction. Cette tâche s'est effectuée en collaboration avec les professionnels locaux, les enseignants locaux de BTS Génie Civil et les départements Génie Civil d'IUT de métropole.

Durant cette phase, les points suivant ont été traités :

- choix des équipements de matériel de TP en fonction des différentes matières enseignées ;
- choix et définition du cahier des charges des équipements spécialisés (presses, banc de flexion etc...) ;
- définition des besoins informatiques pour tout l'IUT, de la stratégie de l'architecture informatique à adopter (serveur Windows NT) en fonction des besoins des utilisateurs (administration) et de l'enseignement (logiciels CAO DAO) ;
- définition des besoins en mobilier pour l'ensemble de l'IUT.

#### **Gestion du premier équipement :**

En collaboration avec le directeur de l'IUT, j'ai eu en charge la gestion du premier équipement de l'IUT qui représentait un budget total de 6 MF environ. L'identification des besoins en équipement pour tous les laboratoires du département Génie Civil et pour l'IUT a permis une gestion plus fine du premier équipement et de son coût prévisionnel. Une note d'ailleurs a été rédigée en juin 1998 pour alerter le Président de l'Université et le Directeur de l'IUT d'une sous-évaluation de l'enveloppe allouée au Génie Civil (3.5 MF sur les 6 MF prévus, alors que 5.8 MF étaient nécessaires pour le fonctionnement seul du département Génie Civil) [Garde 98b].

Grâce à cette note, le département bénéficie depuis 1999 d'un aide annuelle de l'IUT (sur fonds propres) de 150 kF permettant d'augmenter progressivement son taux d'équipement.

#### **Pédagogie - Organisation :**

En parallèle aux tâches de suivi de chantier et de définition des équipements, il fallait également préparer la mise en place fonctionnelle du département, à savoir :

- préparation du mode d'organisation du département de Génie Civil ;
- définition de l'équipe pédagogique ; Recensement des moyens humains à l'intérieur et à l'extérieur de l'Université, aussi bien dans le milieu de l'enseignement que dans le milieu professionnel. Choix des intervenants extérieurs ;
- mise en place de partenariats avec les professionnels locaux et avec d'autres I.U.T de métropole ;
- recrutement des étudiants, communication.



### 1.1.2 Direction du département (1998-2000)

Le département Génie Civil a ouvert ses portes en septembre 1998. J'ai assuré les fonctions de chef de Département durant deux ans. J'ai pu ainsi mettre en place durant mon mandat une organisation et une gestion dont les points principaux sont listés ci-dessous :

#### Gestion financière du département :

- suivi financier du budget de premier équipement (gestion des achats, factures, fournisseurs) ;
- budget de fonctionnement du département (répartition par laboratoires, missions, fournitures, etc...) ;

#### Gestion des postes d'enseignants et moyens humains :

L'ouverture successive des deux années de DUT a permis la création de postes d'enseignants et de IATOS. Le département compte actuellement 15 personnes, dont 6 enseignants titulaires (1 Pr. 60, 2 MCF 60, 3 PRAG GC), 2 MC associés (sur support MCF 60), 1 enseignant d'anglais (à mi-temps sur support PRAG Anglais non pourvu), 1 ATER, 1 doctorant moniteur, 2 IATOS (secrétaire et technicien) et 2 enseignants du secondaire détachés par le rectorat (pour des enseignements de mathématiques et de Génie Civil).

Le tableau ci-dessous récapitule l'évolution des effectifs depuis la création du département :

| 1998                              | 1999   | 2000            | 2001                |
|-----------------------------------|--|-----------------|---------------------|
| 2 MCF 60, 3 PRAG<br>GC<br>2 IATOS | 1 ATER, 1 Pr 60,<br>1 PRAG Anglais<br>1 moniteur (MRT) | 2 PRCE détachés | 1 MCF 60<br>(2 MCA) |

Tableau 1 : Création de postes et moyens humains, département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre.

Par ailleurs, le département compte une vingtaine d'enseignants vacataires provenant des milieux professionnels du bâtiment. Le volume horaire enseigné par ces personnes représente environ 40% du volume total des enseignements.

#### Définition de la politique du département en matière de pédagogie :

- rédaction de fiches pédagogiques pour toutes les matières afin de constituer le programme détaillé des enseignements du département (cours, TD, TP) ;
- rédaction d'un règlement intérieur propre au département (gestion des enseignements, des absences, modalité de contrôle, jurys, gestion des litiges etc...) ;
- définition de la répartition des heures par rapport au programme pédagogique national et des coefficients des matières ;
- emploi du temps, gestion des vacataires.

**Définition de la politique du département en matière d'organisation :**

- constitution du conseil de département ;
- définition et répartition des tâches des enseignants titulaires (gestion des laboratoires, poursuite d'études, stages 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année, taxe d'apprentissage, communication etc...).

**Organisation de manifestations :**

- organisation de l'Assemblée des Chefs de Département Génie Civil (novembre 1999) ;
- organisation des journées portes ouvertes de l'IUT (tous les ans au mois de mars) ;
- voyage d'étude des étudiants de Génie Civil à BATIMAT, novembre 1999 ;
- participation au salon du Bâtiment dans l'Océan Indien (juin 1999) ;
- présentation du département dans les lycées et CIO.

**Communication :**

- création d'un site Web du département : [www.univ-reunion.fr/iut\\_dpt\\_gc](http://www.univ-reunion.fr/iut_dpt_gc) ;
- création d'une plaquette de présentation du département ;
- présentation Powerpoint du département.

## **1.2 Mandats électifs**

Je suis membre élu du Conseil d'Administration de l'IUT depuis 1998 pour le collège des Maîtres de Conférences.

J'ai été également membre élu de la commission de spécialistes des sections 30-37-60-61-62-63) pour l'année 2000-2001. Pour l'année 2001, les commissions de spécialistes ont été renouvelées. Je suis membre élu pour le collège des maîtres de Conférences de la nouvelle commission de spécialistes 60<sup>ième</sup> section.

## **1.3 Chargé par le Président de l'Université de la maîtrise de l'énergie pour les nouveaux projets de bâtiments universitaires du C.P.E.R.**

Le parc patrimonial de l'Université, compte tenu des besoins croissants est en constante progression. Ce parc génère des coûts en fonctionnement importants, à tel point que l'Université figure parmi les 10 plus gros clients d'EDF avec une facture énergétique de l'ordre de 2 MF par an.

J'ai été désigné par Le Président de l'Université de La Réunion, sur proposition du Directeur du Laboratoire, chargé de la maîtrise de l'énergie pour les nouveaux projets de bâtiments prévus dans le Contrat de Plan Etat Région. Notre objectif est de favoriser la construction de bâtiments économes en énergie en favorisant autant que possible les Energies Renouvelables.

A ce titre, j'interviens, en collaboration avec le directeur de la Division du Patrimoine et de la logistique (DIPAL), en phase de programmation pour que soient intégrées dans le programme des recommandations sur la qualité des enveloppes, des systèmes de climatisation

et de production d'eau chaude et sur la maîtrise de l'énergie en général. Jusqu'à ce jour, le cahier des charges inclus dans les programmes de construction sur le volet MDE était trop vague et ne permettait pas au concepteur d'avoir une vision précise des souhaits du maître d'ouvrage. Les recommandations, répertoriées dans une note interne [Garde 01g] ont pour but de préciser certains principes de maîtrise de l'énergie devant être pris en compte par le concepteur pour la réalisation des projets de bâtiments de l'Université de La Réunion.

Ces principes portent sur :

- La conception thermique de l'enveloppe (protection solaire toit, murs, ouvertures) ;
- Le traitement de l'air (pré-rafraîchissement de l'air, espaces tampons pour les locaux climatisés) ;
- La production de l'énergie (développement des ENR, études comparatives);
- Le gestion de l'énergie (Gestion Technique Centralisée);
- Les documents à présenter à l'Université de La Réunion lors des phases d'avancement du projet (études de différentes solutions, présentation d'optimum économies/surcoût etc.).

La note reprend les principes de base d'une bonne conception des bâtiments et des systèmes de production associés et s'appuie sur l'expérience professionnelle acquise pendant mon activité en bureaux d'études, nos activités de recherche actuelles sur ECODOM et sur une concertation parmi les B.E.T. locaux. Elle sera intégrée dans les programmes des projets de bâtiments universitaires prévus dans le CPER.

## **1.4 Suivi scientifique et administratif de projets**

### **1.4.1 IUT Site Pilote en ENR**

Compte tenu des nouvelles contraintes locales en matière de développement des énergies, nous avons rédigé un rapport présentant la politique de recherche de l'équipe Génie Civil pour les 5 prochaines années [Garde 01h]. Nos objectifs étaient de recenser les compétences de l'équipe, les activités de recherche actuelles et celles envisagées dans un futur proche. Grâce à ce support, nous avons pu présenter nos travaux devant les élus de La Région et les responsables de l'Association Régionale des Energies à La Réunion (ARER) afin d'identifier des projets de recherche pouvant être menés en commun. Deux thèmes majeurs ont émergé de nos différents échanges : le confort thermique et les énergies renouvelables. Au regard des compétences et des moyens sur le site de l'IUT, le projet d'IUT « site pilote en ENR » a été avancée et est ainsi devenu l'un des axes de développement de nos activités de recherche et de pédagogie. L'objectif final est de faire du site de Terre Sainte un pôle de compétences en ENR regroupant à la fois des universitaires, des institutionnels et des professionnels. Par ailleurs, ce projet vient appuyer la politique de maîtrise de l'énergie de l'Université qui souhaite réduire la consommation de ses bâtiments.

Une fois le principe du projet accepté par les différents intervenants, le suivi administratif et scientifique a du être mis en place en partenariat avec les différents acteurs, ce qui implique un certain nombre de tâches dont j'ai réalisé le suivi :

- présentation du projet IUT à la Région Réunion (juin 2001) ;
- préparation du phasage et de l'enveloppe financière en collaboration avec l'ARER (juin, juillet 2001). ;

*Le projet se déroule en deux phases telles que représentées par le tableau ci-dessous : dans un premier temps, une phase diagnostic et étude de faisabilité (co-financé par l'Université, l'ADEME et La Région) et une phase ingénierie et travaux dans un second temps.*

| Enveloppe financière IUT Site Pilote   | Coût H.T. (k€) |
|--|----------------|
| <b>Phase 1 : études préalables (financement UR, ADEME, Région) janvier à mars 2002</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>❑ diagnostic énergétique de l'IUT, diagnostic GTC : 45 k€ (financement : IUT) ;</li> <li>❑ réalisation d'une étude de faisabilité sur les différents scenarii possibles concernant les solutions en énergies renouvelables : 38 k€ (financement par ADEME, Région).</li> </ul> | 82 k€          |
| <b>Phase 2 : Assistance à maîtrise d'ouvrage, ingénierie, travaux et mise en exploitation (financement : UR, ADEME, Région).</b>   | 796 k€         |
| <b>Total H.T.</b>  | <b>878 k€</b>  |

*Tableau 2 : Phasage et détail financier du projet IUT Site Pilote en ENR.*

- présentation du projet aux instances de l'Université (Conseil Scientifique et Conseil d'Administration) pour valider le projet et donner les autorisations au Président pour le lancement des consultations, septembre 2001 ;
- suivi des conventions entre l'Université, l'ADEME et La Région, novembre 2001 ;
- définition du cahier des charges pour l'étude de faisabilité (en collaboration avec l'ARER), novembre 2001 ;
- lancement des consultations (en collaboration avec la DIPAL), décembre 2001
- choix de l'équipe de maîtrise d'œuvre, mars 2001 ;
- constitution du dossier d'expertise pour le ministère (en collaboration avec le Rectorat et la DIPAL), février 2001 ;
- suivi technique, choix scientifiques et pédagogiques pour la deuxième phase, juillet 2002.

## 1.5 Mise en place de l'Opération expérimentale ECODOM (1994-1997)

### 1.5.1 Organisation, coordination du groupe de travail ECODOM

*Durant mon contrat d'ingénieur CIFRE au sein du service Maîtrise de l'Energie à EDF Ile de la Réunion, j'ai eu la responsabilité de la mise en place du label ECODOM, tant au niveau scientifique (cette partie est décrite dans les activités de recherche) qu'au niveau organisationnel. Cela supposait donc d'organiser et d'animer des réunions régulières avec un groupe de travail ECODOM regroupant les représentants des acteurs liés au milieu du bâtiment. Ainsi, l'ensemble des tâches réalisées durant cette période sont listées ci-dessous :*

- constitution d'un réseau de partenaires locaux comprenant Architectes, Bureau d'Etudes, Maîtres d'Ouvrage Sociaux, DDE, DRIRE, Région, ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ;
- suivi et participation aux travaux d'élaboration du label thermique dans les domaines de l'habitat neuf et du tertiaire neuf ;
- apport de compétence d'expert thermicien afin de faciliter les opérations Maîtrise de l'Energie dans l'habitat et le tertiaire ;
- animation des réunions régulières pour informer les partenaires locaux des travaux en cours sur les simulations effectuées sur CODYRUN, et sur l'avancement du projet du LABEL ECODOM.

### 1.5.2 Animation de journées de travail portant sur la réglementation thermique dans les DOM

*Toujours dans l'optique de la mise en place d'une réglementation thermique et de la préparation du label ECODOM, plusieurs réunions regroupant l'ensemble des partenaires locaux (EDF, DRIRE, Région Réunion, ADEME, DDE, Maîtres d'Ouvrage Sociaux, Architectes, Bureaux d'Etudes) ont été organisées à mon initiative sur la période 1995-1997. Les objectifs de ces journées étaient les suivants :*

- exposer la problématique de l'habitat à la Réunion dans le domaine du confort thermique ;
- informer les partenaires locaux des travaux menés par l'Université (dont mes travaux ainsi que l'ensemble des travaux menés dans le laboratoire de Génie Industriel depuis une dizaine d'années) concernant ce même domaine ;
- exposer les réflexions et l'avancement du groupe de travail ECODOM et recueillir les idées des différents participants ;
- proposer des critères simples permettant de caractériser les performances thermiques d'un bâtiment.

### 1.5.3 Suivi expérimental et sociologique des premières opérations ECODOM (1998-2000)

*Nous avons obtenu en 1998 un contrat de recherche financé par le Secteur Pilote pour l'Innovation dans l'Outremer (SPIOM) et la Direction Départementale de l'Équipement pour assurer le suivi expérimental et sociologique des premières opérations ECODOM. Il s'agissait de vérifier expérimentalement si les logements étaient confortables pendant la saison chaude. L'étude de l'évolution des paramètres liés au confort thermique dans des logements non occupés mais également occupés devait permettre d'avoir un retour d'expérience sur la qualité des logements construits. Les phases d'instrumentation ont été réalisées par l'ensemble des membres de l'équipe.*

*J'ai assuré plus particulièrement en collaboration avec Harry Boyer le suivi scientifique et technique de ce contrat de recherche de 370 kF sur les deux années. Les principales tâches étaient les suivantes :*

- rédaction de la convention de recherche DDE/Université ;
- suivi et coordination des interventions de l'équipe Génie Civil sur les deux chantiers ;
- relation avec les architectes et les maîtres d'ouvrage (coordination des interventions des deux opérations à instrumenter vis à vis de l'avancement du chantier) ;
- pose des capteurs, câblage, mise en place de l'acquisition et traitement des données (avec l'ensemble des membres de l'équipe Génie Civil) ;
- rédaction des rapports intermédiaires [Garde 98] et finaux [Garde 00a] ;
- rédaction du rapport de synthèse [Garde 00b] ;
- présentation des résultats auprès des financeurs et des partenaires de l'opération lors de journées d'étude [Garde 00c], [Garde 00d] ;
- suivi financier (facturation).

### 1.6 Intervention en assistance à maîtrise d'ouvrage sur les opérations de logements (neufs ou réhabilitation) et des bâtiments HQE (depuis 1997)

Nous intervenons régulièrement en assistance à maîtrise d'ouvrage (pour le compte d'EDF) pour suivre les nouveaux projets de logements dès la phase esquisse et accompagner la maîtrise d'œuvre jusqu'à la réalisation des bâtiments. Notre domaine d'intervention consiste à assurer la qualité thermo-aéraulique des enveloppes de bâtiments. Jusqu'à présent, nous avons analysé une douzaine de projets de logements neufs, deux projets de réhabilitation, cinq projets HQE (Haute Qualité Environnementale) dont trois portant sur des bâtiments à usage d'enseignement (une école maternelle et deux lycées) concernant les cibles « Confort » et « Energie ».

## 2 Relations nationales et internationales

*Les travaux de recherche couplés à la connaissance du milieu local m'ont permis de tisser un réseau de partenaires à la fois scientifiques et industriels aussi bien au niveau local, national et international. Il est important pour notre laboratoire de pérenniser et de renforcer ce réseau de partenaires.*

### 2.1 Relations nationales

- **CETHIL Equipe Thermique du Bâtiment, UPRES A CNRS 5008, INSA Lyon**

*La collaboration avec le CETHIL date de la thèse d'Harry Boyer [Boyer 93], s'est poursuivie avec mes travaux de recherche avec la co-direction de ma thèse par Jean Brau et par la thèse de l'une des nos étudiantes Stéphanie Laporte au CETHIL. La participation à des jurys de thèse des deux laboratoires et de nombreuses publications étoffent cette collaboration [Garde 01b], [Boyer 98], [Boyer 96b], [Brau 98].*

- **LESETH, UPS Toulouse**

*Nous avons pris des contacts avec le LESETH lors des séminaires des journées TRNSYS à Nice en 1998. Depuis, la collaboration s'est traduite par la venue d'Alain Cordier à La Réunion en mai 1999 pour échanger sur la modélisation dans l'environnement TRNSYS et se poursuit actuellement avec les travaux que nous initions sur le confort thermique.*

- **CSTB, Sophia Antipolis**

*Avec le démarrage de nos activités sur les énergies renouvelables, nous avons déjà pris des contacts avec le groupe Energies Renouvelables du CSTB.*

- **EDF Division Recherche et Développement, Groupe modélisation physique des bâtiments**

*Les contacts pris lors de mes travaux de thèse en convention CIFRE à EDF se sont traduits par une collaboration de recherche avec la DRD et par des stages d'étudiants de maîtrise (voir encadrement de stagiaires de deuxième cycle). Nous avons pu échanger des fichiers résultats sur les cellules ETNA et le logiciel CLIM 2000, valider notre code CODYRUN pour le modèle d'enveloppe des cellules ETNA et mener une comparaison intermodèle avec CODYRUN [Mara 00a]. Par ailleurs, nous travaillons actuellement avec la DRD et le bureau d'étude réunionnais INSET sur une comparaison inter-logiciel entre notre code CODYRUN, PAPTER DOM (version multizone simplifiée de CLIM 2000) développé par EDF et le logiciel HAP III de Carrier [Carrier 91] utilisé par les BET locaux.*

### 2.2 Relations internationales

- **Ecole Polytechnique de Montréal**

*La collaboration avec l'Ecole Polytechnique de Montréal date de 1995 [Garde 95]. Elle se traduit actuellement par la venue prochaine à l'IUT du Professeur Michel Bernier en décembre 2001 à La Réunion sur un poste de professeur invité. Les objectifs de cette mission sont des échanges en enseignement et en recherche autour de l'environnement de modélisation EES [Klein 01].*

- **Université de Séville**

*Des relations ont été initiées avec l'Ecole supérieure d'ingénieurs de Séville par l'intermédiaire d'un stage à l'IUT concernant la modélisation des STA et la mise en place de la chaîne d'acquisition du STA-Tron.*

- **Groupe de travail de la Task 22 de l'I.E.A.**

*Nous allons intégrer le groupe de travail international de la Task 22 de l'Agence Internationale de l'Energie (I.E.A.) travaillant sur l'amélioration des codes de simulation énergétiques de bâtiments. L'une des sous-tâches de la Task 22 concerne la validation expérimentale de logiciels et la mise en place d'une nouvelle procédure de comparaison inter-modèle baptisée HVAC BESTEST sur le couplage système/bâtiment. Notre participation consistera en la mise à disposition de données expérimentales sur des protocoles qui seront définis lors de la prochaine réunion du groupe en février 2002.*

- **CANMET Energy Technology Centre, Ottawa, Ontario, Canada.**

*Nous avons récemment rencontré lors du dernier colloque Interuniversitaire Franco-Québécois [Garde 01] Ian Beausoleil Morrison, team manager du Building Simulation Software Group, dont les activités de recherche se rapprochent fortement de celles que j'ai pu présenter dans ce mémoire, notamment en ce qui concerne la validation et le développement de modèles aérodynamiques détaillés [Haddad 01], [Beausoleil 01a], [Beausoleil 01b]. Une collaboration portant sur une confrontation de mesures issues de notre plate-forme expérimentale à des codes de simulation va se mettre en place à compter de décembre 2001. D'autres possibilités sont offertes dans le cadre de la Task 22.*

- **Collaboration avec l'Université d'Antanarivo, Madagascar**

*Une collaboration de recherche existe depuis maintenant plusieurs années entre l'Université d'Antanarivo et notre équipe. Elle se traduit par l'accueil de doctorants malgaches au sein de notre laboratoire. Les travaux menés en partenariat avec l'équipe malgache concernent le développement d'un code simulation sous environnement MATLAB et la validation de ce code. Nous essayons d'apporter notre expérience dans ce domaine et avons à ce sujet accueilli à l'IUT pendant un mois (octobre 2001) Oni Rakotoarivelo qui a pu travailler sur la plate-forme expérimentale de l'IUT (lancement d'acquisitions sur le STA-Tron) et sur les méthodes de validation (BESTEST, plans d'expérience etc..).*

- **Mauritius Research Council, Ile Maurice**

*Les récents travaux liés l'utilisation de notre code CODYRUN et d'ECODOM pour l'amélioration de la conception thermique de logements ont reçu un écho favorable à l'Ile Maurice. Nous avons récemment présenté nos travaux à l'Université de Réduit, Ile Maurice, avec comme support un projet de logements sociaux mauriciens que nous avons modélisé sous Codyrun et analysé selon la méthodologie utilisée pour ECODOM.*

- **Journées de la Recherche "Energies Environnement", 15-18 septembre 2000**

*Ces journées de la recherche ont été organisées dans le cadre de l'Université de l'Océan Indien. L'objectif était de rassembler les chercheurs et équipes de recherche qui travaillent dans le domaine de l'énergie et de l'environnement dans la zone Océan Indien (Ile de La Réunion, Ile Maurice, Seychelles, Madagascar, Comores). Mon apport a consisté à faire partie du comité scientifique et à assurer la présidence de la séance sur le thème « Energie ».*



## 3 Relation avec le monde industriel

### 3.1 Partenaires institutionnels

- **Electricité de France Direction des DOM, EDF Ile de la Réunion :**

*Le partenariat mis en place depuis quatre ans avec EDF en apportant notre compétence d'expertise thermique sur les opérations M.D.E. (Maîtrise De l'Energie) a été pérennisé. Il s'exerce maintenant dans le cadre de conventions d'expertise thermique où nous intervenons en phase amont dans les nouveaux projets de logements pour améliorer leur conception thermique et rendre les logements conformes aux prescriptions ECODOM. Ce travail de partenariat a abouti au recrutement de l'un de nos étudiants par EDF en convention CIFRE (voir Thèse d'Eric Fock dans la partie encadrement doctoral). Nous sommes sollicités par la direction des DOM d'EDF pour travailler sur l'évolution d'ECODOM vers un label à points et sur les réflexions associées à la mise en place de la future codification technique dans les DOM.*

*Enfin, nous intervenons dans le comité de pilotage ECODOM constitué d'EDF, de l'ADEME, La Région Réunion, Promotelec et l'Université. Ce comité a pour rôle l'instruction des dossiers ECODOM et le financement des primes ECODOM (1500 euros par logement labellisé).*

- **ADEME**

*L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie apporte régulièrement son soutien financier aux activités de l'équipe Génie Civil. Sur présentation des différents projets sur lesquels nous nous sommes investis, l'ADEME a financé à hauteur de 50% la cellule LGI et notre banc d'essai pour climatiseur (STA-Tron), ce qui représente une participation financière de 28% dans nos activités de recherche (voir Figure 14 Partie II Chapitre 1). De plus, l'ADEME participe également au projet « IUT Site Pilote ».*

- **Conseil Régional**

*Le Conseil Régional nous a sollicité pour faire une adaptation d'ECODOM aux bâtiments tertiaires et en particulier aux lycées. Nous travaillons également sur un projet de document similaire à celui de l'Université (présenté dans la section 1.3) pour les programmes de construction de lycées.*

*Nous intervenons régulièrement sur demande de La Région Réunion dans les commissions techniques pour les projets de lycées et de bâtiments sur les aspects liés à la conception thermique des enveloppes et des systèmes associés.*

- **Association Régionale de l'Energie à La Réunion**

*Compte tenu des récents problèmes énergétiques mondiaux, une politique de maîtrise de l'énergie et de la valorisation des ressources naturelles énergétiques est actuellement en train d'être mise en place par l'intermédiaire de l'ARER. Le gros projet en partenariat avec l'ARER est bien évidemment le projet IUT Site Pilote, mais nous allons collaborer également sur des sujets portant à la fois sur le confort dans les lycées, sur l'utilisation rationnelle de la climatisation et le développement de nouveaux procédés de climatisation type climatisation solaire.*

*La meilleure illustration de cette collaboration est la récente implantation des locaux de l'ARER sur le site de l'IUT de Saint-Pierre.*

- **Direction Départementale de l'Équipement**

*La DDE nous a sollicité pour que nous pilotions le suivi technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM (voir section 1.5 de ce chapitre). Nous continuons à garder des liens étroits dans le cadre de la codification technique dans les DOM. Ce projet consiste en une refonte de la réglementation technique française adaptée au contexte des DOM. Il implique le ministère de la construction, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et les DDE locales. Nous sommes sollicités par la DDE pour participer aux réflexions sur le sujet avec les autres partenaires du bâtiment, institutionnels, publics et privés.*

### 3.2 Maîtres d'ouvrage sociaux

Les interventions en assistance à maîtrise d'ouvrage que nous avons réalisées pour le compte d'EDF ont permis d'avoir des contacts parmi les maîtres d'ouvrages sociaux. Ceux-ci nous ont récemment consultés pour intervenir sur des problèmes liés à la condensation dans des logements sociaux. L'absence de réglementation, les problèmes de foncier obligent en effet les maîtres d'ouvrage à réaliser des opérations dans « Les Hauts de l'Île de La Réunion », à une hauteur supérieure à 400 m. ceux-ci se retrouvent confrontés à des problèmes de détérioration de leurs bâtiments principalement dus à la condensation et à une mauvaise ventilation des logements. Nous sommes donc intervenus pour le compte de deux maîtres d'ouvrage sociaux sur un suivi expérimental de deux opérations existantes dont le but était d'identifier dans un premier temps les causes des détériorations et dans un second temps de proposer des solutions. Nous avons eu recours à TRNSYS pour modéliser les phénomènes de transports thermique, aérodynamique et hydrique, valider les modèles et améliorer le comportement du bâtiment en modélisant différentes configurations de bâtiments (ventilation mécanique contrôlée, isolation des murs et/ou de la toiture etc.). Le rapport de synthèse [Lucas 00] sert maintenant de référence auprès des maîtres d'ouvrage et des bureaux de contrôle (SOCOTEC, VERITAS) pour la prévention des risques dus à la condensation dans les Hauts de La Réunion. Il est bon de souligner que nous ne voulons en aucun cas nous substituer aux bureaux d'études mais plutôt apporter une compétence complémentaire en modélisation et en instrumentation qui sert à la fois à la profession mais également à nos travaux de recherche (les résultats issus de ces travaux ont été publiés dans la revue Energy and Buildings [Lucas 01a]).

### 3.3 Partenaires professionnels

Des liens étroits existent entre les partenaires professionnels locaux (architecte, BET, entreprises) et notre équipe. Deux éléments ont favorisé la mise en place de ces liens : l'opération expérimentale ECODOM et la création du département Génie Civil à l'IUT de Saint-Pierre. En effet, si ECODOM a initié des contacts lorsque nous avons été en charge de ce projet (constitution de groupe de travail et d'échanges), le département GC les a pérennisés grâce à l'intervention des professionnels dans le cursus du DUT et de la licence professionnelle (cours, TD, TP, suivi de stages et de projets de fin d'étude, participation à la pédagogie du département). De ce fait, l'IUT est devenu un centre d'échanges entre professionnels et universitaires. Grâce à la présence d'un environnement recherche dans le sud, nos partenaires sont au courant de nos avancées aussi bien dans la modélisation que dans la validation.

Nous favorisons ainsi dans ce contexte la communication entre le monde de la recherche et le monde professionnel en faisant bénéficier dans la mesure du possible de nos avancées et en ayant également un retour immédiat de la part de la profession.

Les preuves de cette collaboration peuvent être résumées de manière concrète par la présentation de certains projets en cours :

- mesures des performances acoustiques de logements sociaux pour le compte d'une entreprise du BTP ;
- comparaison inter-logiciel entre CODYRUN, PAPTER DOM (code EDF) et le logiciel HAP III de Carrier utilisé par plusieurs bureaux d'études locaux ;
- formation des BET locaux à l'utilisation de CODYRUN et de TRNSYS ;
- projet de recherche concernant les signatures énergétiques et diagnostics de bâtiments tertiaires en collaboration avec INSET, BET local.

## 4 Activités d'enseignement

*D'une manière générale, mes activités d'enseignement ont couvert de multiples environnements. En effet, j'ai pu enseigner aussi bien dans des filières technologiques (BTS) que scientifiques (Faculté de Sciences et Technologies) en encore à vocation professionnelle (I.U.T. et Ecole d'Architecture de Saint-Denis).*

### 4.1 Enseignant en B.T.S. Equipement Technique et Energie option C « Froid et Climatisation » (1989 – 1990)

Mon expérience en matière d'enseignement a débuté tout d'abord lorsque je suis venu accomplir mon service national sur l'île de la Réunion en tant que Volontaire à l'Aide Technique en 1989-90. J'ai été affecté pendant deux ans (16 mois au titre du service national et 8 mois en tant que maître auxiliaire) au lycée Roland Garros au Tampon pour enseigner en BTS Equipement Technique et Energie option C Froid et Climatisation.

Durant deux années, j'ai enseigné en première et en deuxième année de B.T.S., à raison de 14h par semaine, pendant 30 semaines, soit 420 h. Ce BTS venant de s'ouvrir, il a fallu mettre en place les enseignements suivants :

#### Cours : Etude des systèmes

*L'étude des systèmes regroupe un ensemble de matières permettant l'étude théorique des systèmes de froid et de climatisation, à savoir :*

- Thermique du bâtiment, transferts de chaleur ; échanges de chaleur ; calorimétrie.
- Mécanique des fluides, Thermodynamique.
- Théorie du conditionnement d'air, propriétés de l'air humide.
- Etude des différents type de système de climatisation (tout air, tout eau, air-eau, débit d'air variable ...).

#### Cours : Etude des installations

*Cet enseignement permet d'acquérir un savoir en matière de technologie des installations lié au froid et à la climatisation. Il comprend :*

- **Technologie des matériels de climatisation**
  - Compresseur.
  - Echangeurs (évaporateur, condenseur).
  - Détendeur.
- **Technologie des appareils de climatisation**
  - Split-système.
  - Monobloc.
  - Groupe d'eau glacée.

#### TP : Réalisation et Contrôle

Mesure et évaluation des systèmes, contrôle et vérification d'installation, mise en conformité.

## 4.2 Chargé d'enseignement à l'Université de la Réunion (1994 - 1997)

J'ai eu une coupure de trois ans lorsque j'ai travaillé en bureau d'études en tant qu'ingénieur chargé d'opérations. J'ai par la suite repris des enseignements de 1994 à 1997 au Département de Physique Mécanique de l'Université de la Réunion lorsque ma convention CIFRE avec EDF a démarré en janvier 1994. Bien que le statut d'ingénieur CIFRE ne m'obligeant pas à une charge d'enseignement, j'ai fortement souhaité développer mon expérience pédagogique en milieu universitaire en tant que chargé d'enseignement, non seulement pour retrouver le contact avec les étudiants mais également pour apporter ma contribution au département de Physique-Mécanique, largement déficitaire en heures d'enseignement.

| Discipline            | Nature    | Niveau  |
|-----------------------|-----------|---|
| Physique générale     | TD : 50 h | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(1 <sup>ère</sup> année DEUG SNV)  |
| Mécanique des Fluides | TD : 18 h | 2 <sup>ème</sup> cycle<br>(Licence Physique et Application) |

Tableau 3 : Enseignements effectués en tant que chargé de cours (1994-1997).

## 4.3 A.T.E.R. à l'Université de la Réunion, département de Physique-Mécanique (1997-98)

Mon expérience en enseignement se poursuit pour l'année universitaire 1997-98 en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, toujours au Département de Physique-Mécanique de l'Université de la Réunion. J'ai assuré également un enseignement de Physique du Bâtiment en deuxième année à l'Ecole d'Architecture de Saint-Denis (antenne de l'Ecole d'Architecture de Montpellier).

| Discipline   | Nature    | Niveau   |
|--|-----------|--|
| Physique Mécanique   | TD : 20 h | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(1 <sup>ère</sup> année DEUG SV)            |
| Mécanique du solide  | TD : 40 h | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(2 <sup>ème</sup> année DEUG SM)            |
| Thermodynamique  | TP : 12 h | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DEUG Génie des Procédés)                   |
| Mécanique des Fluides  | TP : 18 h | 2 <sup>ème</sup> cycle<br>(Licence Physique et Application)          |
| TER Maîtrise Physique et Application   | TP : 10 h | 2 <sup>ème</sup> cycle<br>(Maîtrise Physique et Application)         |
| Physique du bâtiment<br>Données climatiques, étude du rayonnement solaire<br>Notion de confort thermique. Propriétés de l'air humide<br>Thermique du bâtiment, transferts de chaleur par convection, conduction, rayonnement<br>Acoustique, Eclairagisme<br>Application à la conception des bâtiments. | CM : 25 h | Ecole d'architecture de Saint-Denis<br>(DEFA 2 <sup>ème</sup> année) |

Tableau 4 : Enseignements effectués en tant qu'ATER (1997-1998).

#### 4.4 Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'I.U.T. de Saint-Pierre (Depuis 1998)

##### 4.4.1 Enseignements dispensés au Département Génie Civil, I.U.T. de Saint-Pierre

Je suis en poste depuis septembre 1998, date d'ouverture du département Génie Civil de l'I.U.T. de Saint-Pierre où j'enseigne principalement la physique du bâtiment (Transferts Thermiques, Mécanique des fluides et Equipements Techniques du Bâtiment) au niveau DUT et licence.

Enfin, compte tenu du faible nombre d'enseignants titulaires, nous suivons trois à quatre projets de fin d'étude à la fin de la deuxième année. Ceci suppose d'avoir au préalable contacté un professionnel et défini en collaboration avec lui un support de PFE (en général un dossier APD ou DCE) et de suivre avec lui le déroulement du PFE.

| Discipline   | Nature  | Niveau  |
|--|---|---|
| Transferts thermiques<br>Mécanique des fluides<br>Thermodynamique<br>Electricité | CM : 14 h, TD : 14h, TP : 12h<br>CM : 18 h, TD : 22h, TP : 12 h<br>TD : 12h, TP : 12h<br>TP : 12h | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DUT 1 <sup>ère</sup> année) |
| Equipements techniques du bâtiment   | CM : 8h, TD : 10h   | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DUT 2 <sup>ème</sup> année) |
| Enseignement spécifique : Conception thermique des bâtiments en climat tropical  | CM : 10h, TP : 10h  | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DUT 2 <sup>ème</sup> année) |
| Projets de fin d'étude   |   | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DUT 2 <sup>ème</sup> année) |
| Physique du Bâtiment, conception thermique des bâtiments, projets HQE            | CM : 10 h, TD : 10 h  | 2 <sup>ème</sup> cycle<br>(Licence Pro)               |

Tableau 5 : Enseignements dispensés à l'I.U.T. de Saint-Pierre – Département Génie Civil (depuis 1998).

##### 4.4.2 Enseignements dispensés à la Faculté des Sciences et Technologies, Saint-Denis

J'ai continué à garder jusqu'en 1999 des heures au département Physique-Mécanique de la Faculté des Sciences ou je suis intervenu en DEUG SM (Mécanique du Solide), Licence (Mécanique des fluides), Maîtrise (Transferts thermiques). Avec l'ouverture de la deuxième année du DUT Génie Civil en septembre 1999, j'ai arrêté la majeure partie de ces enseignements pour me consacrer à la mise en place des enseignements du DUT.

J'assure également 20 h de cours en DEA Mécanique Energie. Il s'agit d'enseignements directement liés à mes activités de recherche, à savoir : la validation globale de codes de simulation thermique de bâtiment et à l'instrumentation des systèmes complexes.

| Discipline   | Nature           | Niveau  |
|--|------------------|---|
| Mécanique du solide ( <i>arrêt en 1999</i> )   | TD : 40h         | 1 <sup>er</sup> cycle<br>(DEUG SM)                            |
| Mécanique des fluides ( <i>arrêt en 1999</i> )   | TP : 18h         | 2 <sup>ième</sup> cycle<br>(Licence Physique et Application)  |
| Transferts thermiques ( <i>arrêt en 1999</i> )   | CM : 7h, TD , 8h | 2 <sup>ième</sup> cycle<br>(Maîtrise Physique et Application) |
| TER Maîtrise Physique et Application<br>TER Maîtrise Sciences Physiques  | TP : 10 h        | 2 <sup>ième</sup> cycle                                       |
| Conception thermique des bâtiments en climat tropical. Diagnostics énergétiques et outils de décision ( <i>arrêt en 2000</i> )     | CM : 20 h        | 3 <sup>ième</sup> cycle<br>(DUMEE)                            |
| Validation de codes de calcul dédiés à la modélisation des bâtiments en régime dynamique<br>Instrumentation des systèmes complexes | CM : 20 h        | 3 <sup>ième</sup> cycle<br>(DEA Mécanique Energie)            |

Tableau 6 : Enseignements dispensés à la Faculté des Sciences et Technologies (depuis 1998).

## 5 Activités pédagogiques

### 5.1 Coordination et mise en place d'enseignements

J'ai mis en place les enseignements relatifs aux Transferts Thermiques et à la Mécanique des Fluides du DUT 1<sup>ère</sup> année (cours, TD, TP). J'assure actuellement la coordination des enseignements liés à la Physique en DUT 1<sup>ère</sup> année.

Au niveau des TP, j'ai la responsabilité des laboratoires d'Electricité/Thermique et de Mécanique des Fluides. Les différentes phases de montage ont consisté à l'identification des TP, leur commande, leur installation et la rédaction des fascicules. Nous avons à ce jour 3 TP de Thermique couplés avec 3 TP d'Electricité et 3 TP de Mécanique des Fluides couplés avec 2 TP de Thermodynamique.

Pour l'ouverture de la deuxième année de DUT en 1999, j'ai coordonné les enseignements relatifs à la physique du bâtiment et j'ai mis en place les enseignements relatifs aux Equipements Techniques de Bâtiment (cours, TD) pour la partie conception thermique, confort, réglementation.

A compter de cette année (2001-02), avec l'ouverture de la licence professionnelle « Gestion et Conduite de Projets », je mets en place des enseignements relatifs à la conception thermique des bâtiments, aux économies d'énergie et à la conception à haute qualité environnementale. L'idée est de faire bénéficier à nos étudiants des connaissances acquises récemment et issues des travaux de recherche en cours ou de nos contacts avec les professionnels. Ainsi, l'expérience acquise au travers de l'opération expérimentale ECODOM est traitée en cours en deuxième année de DUT (enseignements spécifiques) et en licence professionnelle.

## 5.2 Publications liées à la pédagogie

Au titre des publications liées à la pédagogie, j'ai réalisé les documents suivants :

- Règlement intérieur du département Génie Civil de l'IUT, 30 p.
- Polycopié de cours de Transferts Thermiques, DUT 1<sup>ère</sup> année, 50 p.
- Fascicule de TD Transferts Thermiques, DUT 1<sup>ère</sup> année, 24 p.
- Fascicule de TD Mécanique des Fluides, DUT 1<sup>ère</sup> année, 20 p.
- Fascicule de TP Electricité/Thermique, DUT 1<sup>ère</sup> année, 44 p.
- Fascicule de TP Mécanique des Fluides/Thermodynamique, DUT 1<sup>ère</sup> année, 69 p.
- Fascicule de TD Equipement Technique de Bâtiments, DUT 2<sup>ème</sup> année, 25 p.
- Cours de DEA Mécanique Energie « Validation de codes de simulation thermo-aérouauique de bâtiments » : 100 p.

## 5.3 Habilitation de filières

### 5.3.1 Licence Professionnelle « Gestion et Conduite de Projets »

J'ai initié et participé au montage du dossier d'habilitation de la licence professionnelle « Gestion et Conduite de Projets ». Cette licence, habilitée par le ministère, a ouvert à la rentrée de septembre 2001. Les objectifs visés par cette licence sont de former des cadres polyvalents pour la gestion et la conduite de projets dans les domaines du management, de la qualité, de la prévention des risques, de la maîtrise des coûts, de la coordination d'intervenants sur chantiers, de la gestion financière et de la protection de l'environnement.

Les contacts avec les professionnels que nous avons aussi bien en recherche qu'au travers du département Génie Civil avec les stages et les intervenants professionnels ont abouti au constat qu'il manquait des compétences dans la gestion et de la conduite de projets dans le domaine du BTP, de l'énergie et de l'environnement.

Le secteur du génie civil étant actuellement en forte expansion tant au niveau national qu'au niveau local avec l'émergence de grands projets à La Réunion tels que l'autoroute des Tamarins, le développement des logements locatifs sociaux (9000 logements par an), la systématisation dans les nouveaux projets de construction de la prise en compte des contraintes de qualité, d'environnement et d'économies d'énergie, nous avons donc décidé de créer, en partenariat avec les professionnels, une licence professionnelle dans ce domaine. La licence comporte un tronc commun « Gestion » et deux options : la première « option A » est orientée Bâtiment et Travaux Publics », la seconde « option B » est orientée « Habitat, Energie et Environnement ».

Je me suis occupé personnellement des tâches suivantes :

- Mise en place de la maquette pour le tronc commun et l'option B (nombres d'UE, de modules, nombre d'heures, cours, TD, TP).
- Recherche des chargés d'enseignement professionnels.
- Recherche de partenariat avec les professionnels pour les stages.
- Réunion de concertations avec les professionnels.
- Rédaction du projet en collaboration avec l'équipe pédagogique de l'IUT.
- Présentation du projet au CEVU et au CA de l'Université pour validation.

### 5.3.2 I.U.P. Génie Civil

Dans la continuité de création de filières universitaires liées au Génie Civil, le contrat de plan de l'Université de La Réunion prévoit l'ouverture d'un I.U.P. Génie Civil à compter de la rentrée 2003.

Je participe avec Jean Claude Gatina (Pr. 60<sup>ème</sup> section CNU) à l'élaboration de la demande d'habilitation du projet.

L'argumentaire lié à cette création de filière est le suivant :

- D'un point de vue pédagogique, 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).
- Proposer des emplois d'encadrement à nos étudiants, le secteur BTP étant dans les DOM comme ailleurs un secteur à forte activité économique.
- En terme de recherche, la création d'un deuxième cycle viendrait étayer notre activité 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 et la pédagogie enseignée. 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 sujets 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, structure ...

## 6 Encadrement de stagiaires de deuxième cycle

*J'encadre régulièrement des stagiaires de deuxième cycle dans leur cadre de leurs Travaux d'Etudes et de Recherche (Maîtrise Physique et Application et Maîtrise Sciences Physique) ou encore dans le cadre de projets de fin d'étude d'école d'ingénieur Ces stages sont en général liés à nos travaux de recherche en cours (plate-forme expérimentale de l'IUT, instrumentation de logements pour ECODOM), à venir (diagnostic énergétique de l'IUT) ou encore à la pédagogie (mise en place de TP pour le DUT 2<sup>ème</sup> année).*

### 6.1 Encadrement de DUMEE (Diplôme Universitaire de Maîtrise de L'Energie et de L'Environnement)

**Harimala Razanamanampisoa.** 1999. *Instrumentation d'une cellule expérimentale en environnement naturel. Développement de systèmes de traitement d'air.* Stage de DUMEE, Université de La Réunion.



## 6.2 Encadrement de stagiaires d'école d'ingénieur

**Monica Cornejo** 2001. *Elaboration et validation de modèles de systèmes de traitement d'air. Instrumentation d'un banc expérimental de validation.* Stage de fin d'étude, Ecole Supérieure d'Ingénieur de l'Université de Séville.

**Marc Olive** 1996. *Instrumentation d'une cellule expérimentale.* PFE, INSA Lyon, Département GCU.

## 6.3 Encadrement de stagiaires de Maîtrise

**Huet Clarisse, Rivière Karine.** 2000. *Diagnostic énergétique de l'I.U.T. de Saint-Pierre.* Travail d'Etude et de Recherche (T.E.R.) de la Maîtrise es Sciences Physique.

*Ces étudiantes ont réalisé le diagnostic énergétique du bâtiment de l'IUT qui consiste à étudier les points suivants : analyse des factures EDF, analyse de la courbe de charge du bâtiment, reconstitution de la courbe de charges en fonction des usages (climatisation, éclairage, informatique etc.), proposition de solutions visant à économiser l'énergie. Le document sert actuellement de base de travail pour la projet « IUTsite Pilote ».*

**Vienne Françoise, Payet Richard.** 2000. *Réalisation d'une maquette pour la mise en évidence des transferts thermiques et aérauliques dans un bâtiment.* Travail d'Etude et de Recherche (T.E.R.) de la Maîtrise es Sciences Physique.

**Huet Jean-Philippe,** 2000. *Comparaison de trois logiciels utilisés en thermique du bâtiment : HAP III, CODYRUN, PAPTER DOM.* Stage de fin d'études, Maîtrise Physique et Application réalisé à INSET, B.E.T. Fluides en collaboration avec la Division Recherche et Développement d'EDF Renardières.

**Payet Jean Philippe.** 1999. *Recherche de corrélations entre l'appel de puissance zonal de l'Ile de La Réunion et les données climatiques.* Stage de fin d'études, Maîtrise Physique et Application réalisé au service logistique d'EDF Ile de La Réunion.

**Buat Menard.** 1999. *Recherche de corrélations entre l'appel de puissance zonal de l'Ile de La Réunion et les données climatiques.* Stage de fin d'études, Maîtrise Physique et Application réalisé au service logistique d'EDF Ile de La Réunion.

**Hoareau Davy.** 1998. *Validation de modèles de transferts aérauliques sur le logiciel CLIM2000,* Stage de fin d'études, Maîtrise Physique et Application effectué à la Division Recherche et Développement d'EDF, Renardières, France.

*Le thème du stage est la validation de modèles de transferts aérauliques intégrés à CLIM 2000 (logiciel développé par EDF) en comparaison avec les résultats expérimentaux de la maison de Bouin, maison expérimentale du C.S.T.B. de Nantes.*

**Laporthe Stéphanie.** 1997. *Maîtrise de Physique et Application, 1997. Expérimentation thermique de logements dans le cadre du label ECODOM.*

*Cette étudiante est partie ensuite en DEA et thèse à l'INSA de Lyon. La thèse a été soutenue en décembre 2000. Stéphanie est actuellement en post-doc au CSTB, Sophia Antipolis à la Division Energies Renouvelables.*

**Forestier Mathieu.** 1995, 1996. *Simulations à l'aide du logiciel CODYUN dans des habitats type réunionnais pour l'élaboration du label ECODOM.* Stages de MST de Physique Appliquée à l'Habitat et au milieu de vie, Université Paul Sabatier, Toulouse.

# Bibliographie

- [Abelard 99] Abelard S. 1993. 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 73 p.
- [Adelard 98a] Adelard L. 1998. Classification climatique approfondie des régions réunionnaises. Mise en oeuvre d'un générateur de données climatiques cohérentes. Thèse Université de la Réunion.
- [Adelard 98b] Adelard L., Pignolet Tardan F., Lauret P., Mara T., Garde F., Boyer H. 1998. Sky temperature modelling for thermal building application, *Renewable Energy*, 15 :418-430
- [Adelard 00] Adelard L., Boyer H., Garde F., Gatina J.C. 2000. A detailed weather data generator for building simulation. *Energy and Buildings* 31:75-88.
- [Allard 87] Allard F., Brau J., Inard C., Pallier J.M. Thermal experiments of full-scale dwelling cells in artificial climatic conditions. *Energy and Buildings* 10:49-58.
- [Auger 97] Auger F., Flandrin P., Gonçalves P., Lemoine O. 1997. Time-frequency toolbox for use with MATLAB.
- [Aude 98] Aude P., Depecker P. 1998. Perturbation of the Input Data of Models Used for the Prediction of Turbulent Air Flow in an Enclosure, *Numerical Heat Transfer Part B* 34 (2): 139-16
- [ASHRAE 01] ASHRAE - Fundamentals Handbook, 2001 published by the ASHRAE inc. 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329.
- [ASHRAE 83] ASHRAE. 1983. ANSI/ASHRAE Standard 116-1983. Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioners and heat pumps. Atlanta: American Society of Heating refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.
- [Baronnet 87] Baronnet F. Etude thermique de l'habitat individuel à la Réunion. Thèse : Sci. : Université de Paris VII, 1987. 182 p.
- [Bastide 01] Bastide A., Boyer H., Lauret P., Lucas F., Garde F. 2001. Intégration à TRNSYS du noyau de CODYRUN, code de simulation thermo-aéraulique de bâtiments : le Type 59. 4<sup>ème</sup> séminaire TRNSYS-EES francophone, Lyon, Septembre 2001.
- [Bauman 83] Bauman F. et al. 1983. Verification of BLAST by comparison of a solar-dominated test cell and a thermally massive building. *Transactions of ASME, Journal of Solar Energy Engineering* 105:207-216.
- [Beausoleil 01a] Beausoleil-Morrison I. 2001. An Algorithm for Calculating Convection Coefficients for Internal Building Surfaces for the Case of Mixed Flow in Rooms. *Energy and Buildings* 33 (4):351-361.
- [Beausoleil 01b] Beausoleil-Morrison I. 2001. La confluence entre la modélisation thermique et la modélisation aéraulique adaptée aux conditions. Vème Colloque Interuniversitaire FrancoQuébécois, Lyon.
- [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.
- [Boyer 93] Boyer H. 1993. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles, Thèse INSA Lyon.

- [Boyer 96a] Boyer H., Garde F., Mara T., Lucas F., Adelard L. 1996 "Rapport de fin de convention cellule expérimentale de mesure en environnement extérieur pour validation du logiciel CODYRUN". Convention ADEME - Université de la Réunion.
- [Boyer 96b] 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 98] 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 99a] 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.
- [Boyer 99b] Boyer H. 1999. Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications. Mémoire d'HDR, Université de La Réunion. 142 p.
- [Boyer 01] Boyer H., Lauret P., Youne A., Bastide A., Mara T. 2001. D'un code de simulation thermique du bâtiment à l'observation d'état : présentation de deux applications. V<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Lyon, mai 2001.
- [Bloomfield 88] Bloomfield D. 1988. An investigation into analytical and empirical validation techniques for dynamical thermal models in buildings. BRE/SERC Collaboration, Final report.
- [Brau 80] Brau, J. 1980. 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, 295 p.
- [Brau 98] Brau J., Boyer H., Roux J.J. 1998. Modélisation d'une véranda et de sa protection solaire dans l'environnement TRNSYS. Séminaire Français TRNSYS, 17-18 Avril 1998, Nice (France)
- [Calogine 97] Calogine D. 1997. 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.
- [Carrier 60] Manuel CARRIER. 1ère Partie : Bilan thermique. Carrier International, LTD, New York, 1960.
- [Carrier 91] Manuel de HAP-Carrier inc.
- [Carrier 96] Carrier, Catalogue gamme professionnelle 1995-1996.
- [Célaire 97] Célaire R., Jourdan O. 1997. Opération expérimentale ECODOM, cahier de prescriptions. Document de référence Antilles et Bas de La Réunion. 31p.
- [Clarke 85] Clarke, J. A. Energy simulation in building design. Glasgow (U.K.) : Adam Hilger Ltd, 1985. 383 p. ISBN 0-85274-797-7
- [Dalicieux 93] Dalicieux, P., Rahni, N. Validation : Méthode de comparaison calculs/mesures en simulation dynamique, exemple d'application. Note EDF n° HE 14 W 3483, 1993. 21 p.
- [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.
- [Ellis 01] Ellis M.W., Mathews E.H. A new simplified thermal design tool for architects *Building and Environment* 2001;36:1009-1021.
- [ESRU 96] Energy Systems Research Unit, The ESP-r System for building Energy Simulations: User Guide version 9 Series, ESRU Manual U96/1, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 1996.
- [Feustel 99] Feustel H.E. COMIS - an international multizone air-flow and contaminant transport model, *Energy and Buildings*, 30, 105-115, 1999.
- [Fock 00] Fock E., Lauret A. P., Garde F., Gatina J.C. 2000. Artificial neural networks for the prediction of cooling loads of HVAC systems : a case study under a tropical climate. *Renewable Energy Part I* :661-664 Présenté à WREC 2000, Brighton, juillet 2000.
- [Forestier, 96] Forestier, M. (1996) : Simulation du comportement thermique de logements types à la Réunion pour le label ECODOM. MST de Physique Appliquée à l'Habitat et au Milieu de Vie, Rapport de DEA, Université Paul Sabatier Toulouse III.
- [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 evaluation, *Energy and Buildings*, 30, 61-71, 1999.
- [Garde 93] Garde F., Diagnostics énergétiques de bâtiments tertiaires à l'Île de la Réunion : Aéroport International Rolland Garros Saint-Denis, D.D.A.S.S Saint-Denis, Station thermale de Cilaos, C.A.F. Saint-Pierre, Ghanty Royal Saint-Denis et Saint-Louis, Gold Center Saint-Denis, Ets ADAME Saint-Denis. Rapports d'études, BET INSET, période 1991-1993.
- [Garde 94] Garde, F., Vuillemin, C. , Gatina, J.C., Caractérisation des performances thermiques du complexe de toiture Bardeau/Sisalation. Rapport de recherche, convention Université/ADEME, 1994. 43 p.
- [Garde 95] Garde F., Boyer H., Brau J., Gatina J.C. 1995. Validation expérimentale d'un code de modélisation thermique de bâtiments (CODYRUN). Une application en climat tropical humide. Ilième Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Thermique des systèmes à température modérée. Sherbrooke, Montréal, Canada, p. 197-202.
- [Garde 96a] Garde F. 1996. Description du site expérimental de l'Hermitage. Document interne, Université de la Réunion.
- [Garde 96b] Garde F., Boyer H., Adelard L., Gatina J.C. 1996. Rapport Label Ecodom. Validation des prescriptions du document du label. Application à des logements types à l'Île de la Réunion. Rapport de recherche. Convention EDF Direction des DOM-Université de la Réunion, 1996, 140 p.
- [Garde 97a] Garde F. Validation et développement de modèle thermo-aéraulique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de système. Thèse Sci. : Université de la Réunion, Juillet 1997.

- [Garde 97b] Garde F., Adelard L., Boyer H., Célaire R. 1997. Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings. In proceedings of CLIMA 2000, Bruxelles.
- [Garde 98] Garde F., Pignolet-Tardan F, Mara T., Boyer H. 1998. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. Rapport intermédiaire : opération « La Trinité ». Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, novembre 1998, 82 p.
- [Garde 98b] Garde F. Dossier de demande de complément de financement pour le premier équipement de l'I.U.T. de Saint-Pierre. Note interne, Université de La Réunion juin 1998.
- [Garde 99] Garde F., Boyer H., Gatina J.C. 1999. Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings. *Building and Environment* 34 (1):71-84.
- [Garde 00a] Garde F., Adelard L., Mara T., Poudroux P., Boyer H. 2000. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. Rapport intermédiaire : opération « La Découverte ». Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, octobre 2000, 60 p.
- [Garde 00b] Garde F., Boyer H., Adelard L. 2000. Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM à l'île de La Réunion. Note de synthèse LGI/IPSOS O.I.. Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, novembre 2000, 20 p.
- [Garde 00c] Garde F. 2000. Présentation des résultats de l'évaluation technique des opérations « La Découverte et La Trinité ». Compte rendus des Journées ECODOM 15-16 novembre 2000.
- [Garde 00d] Garde F. 2000. Les nouvelles solutions techniques mises en œuvre dans les opérations neuves et la réhabilitation. Compte rendus des Journées ECODOM 15-16 novembre, novembre 2000.
- [Garde 01a] Garde F., Boyer H., Célaire R. 2001. Bringing simulation to implementation : Presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. *Solar Energy* 71 (2):109-120.
- [Garde 01b] Garde F., Lucas F., Boyer H., Brau J. 2001. Multiple model approach of a residential heat pump for integration in building thermal simulation code and comparison with experimental results. *ASHRAE Transactions*, 107 (1) n°4412.
- [Garde 01c] F. Garde-Bentaleb, H. Boyer, F. Miranville, P. Depecker. 2001. Bringing scientific knowledge from research to the professional fields : the case of the thermal and airflow design of buildings under tropical climates. Manuscript accepté à *Energy and Buildings*, septembre 2001
- [Garde 01d] Garde F., Adelard L., Mara T., Lucas F., Miranville F. 2001. Implementation and experimental validation of passive design principles used in naturally ventilated buildings under humid tropical climates. In proceedings of CLIMA2000, Naples, 13-15 septembre 2001
- [Garde 01e] Garde F., Lauret A.P., Bastide A., Mara T., Lucas F.. Development of a nondimensional model for estimating the cooling capacity and electric consumption of single speed split-systems incorporated in a building thermal simulation program, Soumis à *ASHRAE Transactions* (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers), septembre 2001.

- [Garde 01f] Garde F., Adelard L., Fock E., Mara T. 2001. Experimental validation of passive design specifications used in low-cost housing under tropical climates. Soumis à Building and Environment.
- [Garde 01g] Garde F. 2001. Maîtrise de l'Energie dans les projets de bâtiment de l'Université de La Réunion. Note à intégrer dans les pré-programmes et programmes de construction des nouveaux bâtiments du Contrat de Plan Etat/Région. Note interne, Université de La Réunion, juin 2001, 13 p.
- [Garde 01h] Garde F., Boyer H., Lucas F., Adelard L. 2001. Politique de recherche 2001-2005, Equipe Génie Civil Thermique de l'Habitat, Université de La Réunion, Rapport interne des activités de recherche de l'équipe Génie Civil, juin 2001.
- [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. 1984. 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, 159 p.
- [Girault 95] Girault P., Delille S. Description des cellules ETNA, configuration matérielle et géométrique, Note EDF-DER HE-14/93/003.
- [Goldsmith 80] Goldsmith, V.W., Hart, G.H., Reiner, R.C. 1980. A note on the degradation coefficient of a field tested heat pump cooling and heating mode. ASHRAE Transactions 86 (2) :368-375.
- [Guyon 99] Guyon G. Palomo E. 1999. Validation of thwo french building energy programs Part 1 : analytical verification. ASHRAE Transactions Vol.105, Part 2, Paper number SE-99-6-2, 694-708.
- [Haddad 01] Haddad K.H., Beausoleil Morrison I. 2001 Results of the HERS BESTEST on a Energy Simulation Computer Program, ASHRAE Transactions CI-01-10-1.
- [Hart 80] Hart G.H., Goldschmidt V.W.1980. Field measurements of a mobile home unitary heat pump (in a heating mode). ASHRAE Transactions 86 (2) :347-357.
- [Helton, 93] Helton, J.C. 1993. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Use in Performance Assessment for Radioactive Waste Disposal, Reliability Engineering and System Safety, Vol.42, pp.327-367.
- [Henderson 92] Henderson H.I., Rengarajan, K., Shirey, D.B. 1992. The impact of comfort control on air conditioning energy use in humid climates, ASHRAE Transactions, 98 (2):104-113.
- [Henderson 96] Henderson H.I., Rengarajan, K. A model to predict the latent capacity of air conditioners and heat pumps at part load conditions with the constant fan mode. ASHRAE Transactions, 102 (1).
- [Henderson 00] Hendersson, H.I., Parker, D., Huang, Y.J. 2000. Improving DOE-2's RESYS routine : user define functions to provide more accurate part load energy use and humidity predictions. In proceedings of ACEEE Summer study on Energy efficiency, Pacific Grove, CA. Technical report LBNL-46304 consultable à <http://gundog.lbl.gov/>
- [Hens 95] Hens, H. 1995. HVAC and the Building : Siamese Twins (An integrated Design Approach). HVAC&R Research, 1 (4):225-226.
- [Hirsch 82] Hirsch, J.J. 1982. Simulation of HVAC Equipment in the DOE-2 Program. In proceedings of System simulation in Buildings, Liège : 89-107.

- [Holtz 96] Holtz M. 1996. Research Work Plan. Task 22 : Building Energy Analysis Tools, International Energy Agency.
- [Hong 00] Hong, T, Chou, S.K. et Bong, T.Y. 2000 : Building Simulation : an Overview of Developments and Information Sources. Building and Environment, Vol. 35, pp. 347-361.
- [Hugot 87] Hugot E. La sucrerie de cannes, Lavoisier Technique et Documentation, 1987
- [IEA 94] International Energy Agency. 1994. Bringing simulation to application. Final proposal for a new IEA Annex, 14 p.
- [IEA-ECBCS] IEA-ECBCS annexes : <http://www.ecbcs.org/annexes.html>
- [INSET 97] B.E.T. INSET, IPSOS O.I. 1997. Etude de marché de la protection solaire à la Réunion, Phase I. Description de l'offre et quantification du marché. Etude de marché Financée par l'ADEME et la Région Réunion.
- [Jensen, 91] Jensen, O. & Van de Perre, R. 1991 : Tools for Whole model Validation of Building Simulation Programs. IBPSA Conference (Sophia Antipolis, Nice, 20-22 Août 91).
- [Judkoff 83] Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B., Burch, J. 1983. A methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations. Draft Report SERI/TR-254-1508, Golden, CO, 204 p. Solar Energy Research Institute (maintenant NREL).
- [Judkoff 88] Judkoff, R. 1988. Validation of Building Energy Analysis Programs at the Solar Energy Research Intitute. Energy and Buildings 10 :221-239.
- [Judkoff, 95a] Judkoff, R. & Neymark, J. 1995 : Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. Manuel d'utilisation. IEA 12B/21C, National Renewable Energy Laboratory Report NREL/TP-472-6231.
- [Judkoff 95b] Judkoff, R.D., Neymark, J.S. 1995 : A Procedure for Testing the Ability of Whole Building Energy Simulation Programs to Thermally Model the Building Fabric. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of ASME 117 :7-15.
- [Katipulama 91] Katipulama, S., O'Neal, D.L. 1991. Performance degradation during on-off cycling of single speed heat pumps operating in the cooling mode : experimental results. ASHRAE Transactions, 97 (2):331-339.
- [Khattar 84] Khattar M.K. Residential air-conditionning energy calculations. 1984. ASHRAE Transactions 90 (2) :59-72.
- [Kleijnen 97] Kleijnen J.P.C. 1997. Sensitivity analysis and related analyses : a review of some statistical techniques, Journal of Statitics and Computers in Simulation 57:11-14
- [Klein 01] Klein S.A., Alvarado F.A. EES : Engineering Equation Slover. Copyright 1992-2001. [www.fchart.com](http://www.fchart.com).
- [Lauret 01a] Lauret A.J.P., Mara T. A., Boyer H., Adelard L., Garde F..2001 A validation methodology aid for improving a thermal building model : how to account for diffuse radiation in a tropical climate. Energy and Buildings 33 :711-718.
- [Lauret 01b] Lauret P., Boyer H., Mara T., Garde F., Sero-Guillaume O. 2001. Algorithmes génétiques appliqués à la validation en thermique des bâtiments. V<sup>ième</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, INSA Lyon, mai 2001.
- [Lauret 00] P. Lauret, T.A. Mara & al. 2000. Analyse de sensibilité paramétrique du modèle thermique d'une cellule expérimentale, Congrès IBPSA France 2000, Sophia-Antipolis, 26-27 Oct.



- [Lebrun 78] Lebrun J. 1978. Etudes expérimentales des régimes transitoires en chambres climatiques ; ajustement des méthodes de calcul. Journées "Bilan et Perspectives Génie Civil", INSA de Lyon.
- [Lomas 91] Lomas K.J. 1991. IEA task VIII Empirical validation : a critical appraisal, BRE, Reserch Report 3.
- [Lomas 92] Lomas K.J., Eppel H. 1992. Sensitivity analysis techniques for building simulation programs, *Energy and Buildings* 19:21-24.
- [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., Gatina, J.C. 1997. Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de système de traitement d'air. In *Proceedings of IIIième Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois*, Toulouse.
- [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
- [Lucas 00] Lucas F., Adelard L., Garde F., Boyer H. 2000. Expertise des logements dans les hauts de La Réunion. Dégradation des bâtiments dues aux problème de condensation. Convention SODEGIS/LGI.
- [Lucas 01a] F. Lucas, L. Adelard, F. Garde, H. Boyer. 2001. Study of moisture in buildings for hot humid climates. Manuscript accepté à *Energy and Buildings*, septembre 2001.
- [Lucas 01b] Lucas F., Adelard L., Garde F., Mara T., Miranville F. 2001. Experiments and numerical simulations in order to study the problems of condensation and comfort in wet tropical climate. In *proceedings of CLIMA2000*, Naples, 13-15 septembre 2001.
- [Lucas 01c] Lucas F., Garde F. 2001. Projet « IUT site pilote en énergies renouvelables » Rapport interne, IUT Département Génie Civil, juin 2001.
- [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] T. Mara, L. Adelard, P. Lauret, F. Garde. Présentation d'une application dédiée à la validation de codes de simulation thermique de bâtiment. I.B.P.S.A. '98, International Building Performance Simulation Association, Sophia-Antipolis, France, 10-11 décembre 1998.
- [Mara 00a] Mara T. 2000. Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéraulque du bâtiment : Proposition de nouveaux outils d'aide à la validation. Ph.D. Thesis. University of Reunion Island.
- [Mara 00b] T. Mara, H. Boyer, F. Garde, L. Adelard. Proposition et application d'une technique d'analyse de sensibilité en thermique du bâtiment. Congrès SFT 2000 (Société Française des Thermiciens), Lyon mai 2000, 795-800.
- [Mara 00c] Mara T., Mamode M., Lauret P., Garde F. 2000. Validation expérimentale des logiciels de simulation du comportement thermique du bâtiment: l'apport des outils d'analyse spectrale, *International Building Performance Simulation Association, IBPSA France*, pp. 143-150.
- [Mara 01a] Mara T., Garde F., Boyer H., Mamode M. 2001. Empirical validation of a solar test cell. *Energy and Buildings* 33 (6) : 589-599.
- [Mara 01b] Mara T., Boyer H., Garde F.. Parametric sensitivity analysis in thermal building

- using a new method based on spectral analysis. Submitted to Transactions of ASME (American Society of Mechanical Engineers), International Journal of Solar Energy Engineering.
- [Martin, 94] Martin, C.J., Seale, C.F., Eppel, H. 1994 : Analytical of Detailed Thermal Simulation Programs, Proceedings of BEPAC Conference, Building Environmental Performance Analysis Club, U.K., pp. S27-S33.
- [Meldem 98] Meldem R., Wilkenmann F., 1998. Comparison of DOE-2 with temperature measurements in the Pala test houses. *Energy and Buildings*. 27:69-81.
- [Mezino 85] Mezino J. Etude du gisement solaire de l'île de la Réunion. Thèse : Sci. : Université Paris VI, 1985. 158 p.
- [Miller 85] Miller W.A., The laboratory evaluation of the heating mode part load operation of an air-to-air heat pump. *ASHRAE Transactions* 91 (2B) : pp. 524-536.
- [Miranville 99] Miranville F. 1999. Mise en place d'une plate-forme expérimentale - Réalisation et instrumentation d'un dispositif de caractérisation d'isolants minces réfléchissants. La Réunion : Université de La Réunion, DEA Mécanique-Energétique. 160 p.
- [Miranville 00a] F. Miranville, E. Fock, F. Garde, L. Adelard. Etude expérimentale d'une toiture composite incluant un isolant mince réfléchissant en climat tropical humide. Congrès SFT 2000 (Société Française des Thermiciens), Lyon mai 2000, 273-278.
- [Miranville 00b] Miranville F., Fock E, Garde F., Hervé P. 2000. Experimental study of the thermal performances of a composite roof including reflective insulation materials in tropical humid climatic conditions. *Renewable Energy Part I*. Présenté à WREC 2000, Brighton, juillet 2000.
- [Miranville 00c] Miranville F., Garde F., Adelard L., Lucas F., Mara T., Boyer H. 2000. Présentation d'une plate-forme expérimentale dédiée a la thermique du bâtiment. Journées de la recherche « Energie et Environnement », Saint-Denis de La Réunion, 15-18 septembre 2000.
- [Mulroy 85] Mulroy, W.J. and D.A. Didion. 1985. Refrigerant migration in a split-unit air conditioner. *ASHAE Transactions* 91 (1A):193-206.
- [O'Neal 91] O'Neal, D.L, Katipamula, S. 1991. Performance degradation during on-off cycling of single-speed air conditioners and heat pumps : Model development and analysis. *ASHRAE Transactions* 97 (2) : 316-323.
- [O'Neal 93] O'Neal, D.L, Katipamula, S. 1993. Development of nondimensionnal cycling model for estimating the seasonal performance of Air conditioners. *Transactions of ASME Journal of Solar Energy Engineering* 115 : 176-181.
- [Palomo, 91] Palomo, E., Marco, J. et Madsen, H. 1991 : Methods to Compare Measurements and Simulations. *Building Simulation '91, IBPSA Conference (Sophia Antipolis, Nice, 20-22 Août 91)*, pp. 570-577.
- [Parken 77] Parken, W.H., Beausoleil, R.W. Kelly, G.E. 1977. Factors affecting the performance of a residential air-to-air heat pump, *ASHRAE Transactions*, 83 (1) n° 4269 : 839-849.
- [Rabenstein 96] Rabenstein R. et Bartosch T. 1996. Wavelets analysis of meteorological data, Congrès Eurotherm.
- [Rahni 97] Rahni N., Ramdani N., Candau Y., Guyon G.: Application of group screening to dynamic building energy simulation models. *J. Statist. Comput. Simul.*, Vol. 57, pp. 285-304, 1997.
- [Ramdani 97] N. Ramdani, Y. Candau, S. Dautin & al. 1997. How to improve building thermal

- simulation programs by use of spectral analysis. *Energy and Buildings*, Vol 25, pp. 223-242.
- [Rasmussen 87] Rasmussen et al. 1987. performance of engine driven heat pumps under cycling conditions. *ASHRAE Transactions* 93 (2) :1078-1090.
- [Reverdom 95a] Logiciel REVERDOM v. 1.0. Manuel d'utilisation, 1995, 159 p. Distribué par SFEE, auteur BBS SLAMA.
- [Reverdom 95b] Logiciel REVERDOM v. 1.0. Annexes de calcul. 1995 66 p. Distribué par SFEE, auteur BBS SLAMA.
- [Saltelli, 2000] Saltelli, A., Chan, K.P.-S., Scott, M. 2000. *Sensitivity analysis*, édition John Wiley & Sons Juin 2000.
- [Saltelli, 99] Saltelli, A., Tarantola, S. & Chan, K.P.-S. 1999. A quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output, *Technometrics*, Vol.41 (1), pp.39-56.
- [Seauve 00] Seauve L. 2000. Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM en Guadeloupe. Synthèse, convention d'étude 98000094, SPIOM DDE/BET Sunstice, Janvier 2000, 105 p.
- [SODEGIS 00] Expertise de logements dans les hauts de La Réunion. Etude des problèmes de condensation. 2000. Convention Université de La Réunion/SODEGIS.
- [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.
- [Soubdhan 00] Soubdhan T., Mara T., Boyer H. 2000. BESTEST a validation procedure applied to CODYRUN a thermal simulation software, WREC 2000, World Renewable Energy Congress, Brighton, U.K., pp. 1800-1803, Part III, July 2000.
- [SPIOM 98] Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM à l'île de La Réunion, 1997-2000. Convention Etat/UR. DDE-Réunion. SPIOM Secteur Pilote Innovation Outremer
- [Strachan, 93] Strachan, P. 1993 : Model Validation using the PASSYS Test Cells, *Building and Environment* 28 (2) : 153-165.
- [SUNSTICE 98] Appui technique pour expertise de logements ECODOM en Guadeloupe. 1998. Convention BET Sunstice/LGI.
- [Taldir 96] Taldir, J.M. 1996. Le fonctionnement des climatiseurs individuels split et windows dans les conditions des DOM : Impact sur la consommation électrique. Note EDF n° HE-11/96/026, 74 p.
- [TER 00] Tableau Economique de La Réunion (T.E.R.). Edition 2000-2001. INSEE-Réunion 212 p. ISSN : 1249-4305.
- [Tourrand 91] Tourrand C. 1991. 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. 1994. Caractérisation thermique de parois de construction par des mesures en site réel, *Revue Générale de Thermique*, n° 387, mars 1994.
- [TRNSYS 97] TRNSYS, A transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI, 1997.
- [Vaxelaire 89] Vaxelaire P. 1989. Etude de la répartition spectrale du rayonnement solaire au sol à l'île de la Réunion, Thèse Université de Paris VII, 212 p.

# Annexes

## Annexe A

Liste exhaustive des publications

## Annexe B

Encadrement doctoral

## Annexe C

Financement, contrats de recherche

## Annexe D

Principales publications

## Annexe A

# Liste exhaustive des publications

Revue spécialisée avec comité de lecture : 14

Communications : 37

Rapports de contrat : 22

Publications récentes en cours d'évaluation : 3

Mémoires : 3

**REVUES SPÉCIALISÉES AVEC COMITÉ DE LECTURE (14)****Revues internationales à comité de lecture (10)**

- [P1] Garde-Bentaleb F., Boyer H., Miranville F., Depecker P. 2001. Bringing scientific knowledge from research to the professional fields : the case of the thermal and airflow design of buildings under tropical climates. Manuscript accepté à **Energy and Buildings**, septembre 2001.
- [P2] Garde F., Lucas F., Boyer H., Brau J. 2001. Multiple model approach of a residential heat pump for integration in building thermal simulation code and comparison with experimental results. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, 107 (1), n°4412.
- [P3] Lucas F., Adelard L., Garde F., Boyer H. 2001. Study of moisture in buildings for hot humid climates. Manuscript accepté à **Energy and Buildings**, septembre 2001
- [P4] Lauret A.J.P., Mara T. A., Boyer H., Adelard L., Garde F. 2001. A validation methodology aid for improving a thermal building model : how to account for diffuse radiation in a tropical climate. **Energy and Buildings** 33 (2001):711-718.
- [P5] Garde F., Boyer H., Célaire R. 2001. Bringing simulation to implementation : Presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. **Solar Energy** 71 (2):109-120.
- [P6] Mara T., Garde F., Boyer H., Mamode M.. 2001. Empirical validation of a solar test cell. **Energy and Buildings** 33 (6):589-599.
- [P7] Adelard L., Boyer H., Garde F., Gatina J.C. 2000. A detailed weather data generator for building simulation. **Energy and Buildings** 31:75-88.
- [P8] Garde F., Boyer H., Célaire R. 2000. Elaboration d'un label de conception thermique des bâtiments dans les départements d'outremer français. **Annales du Bâtiment et des travaux publics** 2 :27-40 ISSN 1270-9840
- [P9] Garde F., Boyer H., Gatina J.C. 1999. Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings. **Building and Environment** 34 (1):71-84.
- [P10] Boyer H., Garde F., Gatina J.C., Brau J. 1998. A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes. **Energy and Buildings** 28 (1):71-79.

**Actes de congrès publiés dans une revue internationale (4)**

- [P11] Adelard L., Pignolet-Tardan F., Lauret A. P., Mara T., Garde F., Boyer H. 1998. Sky temperature modelling for building thermal simulation. **Renewable Energy**, 15 :418-430. Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Italie.
- [P12] Fock E., Lauret A. P., Garde F., Gatina J.C. 2000. Artificial neural networks for the prediction of cooling loads of HVAC systems : a case study under a tropical climate. **Renewable Energy Part I** :661-664 Présenté à WREC 2000, Brighton, juillet 2000.
- [P13] Lucas F., Mara T., Garde F., Boyer H. 1998. A comparison between CODYRUN and TRNSYS simulation codes for thermal building behaviour. **Renewable Energy** 15 Part II :1624-1633. Présenté au congrès World Renewable Energy Congress, Italie
- [P14] Miranville F., Fock E., Garde F., Hervé P. 2000. Experimental study of the thermal performances of a composite roof including reflective insulation materials in tropical humid climatic conditions. **Renewable Energy Part I**. Présenté à WREC 2000, Brighton, juillet 2000.

**COMMUNICATIONS (37)****Congrès internationaux, avec actes publiés (20)**

- [CI1] Garde F., Adelard L., Mara T., Lucas F., Miranville F. 2001. Implementation and experimental validation of passive design principles used in naturally ventilated buildings under humid tropical climates. In proceedings of **CLIMA2000**, Naples, 13-15 septembre 2001
- [CI2] Lucas F., Adelard L., Garde F., Mara T., Miranville F. 2001. Experiments and numerical simulations in order to study the problems of condensation and comfort in wet tropical climate. In proceedings of **CLIMA2000**, Naples, 13-15 septembre 2001.
- [CI3] Garde F., Lucas F., Mara T., Adelard L., Fock E., Depecker P. 2001. De la simulation à la réalisation : Présentation d'une approche globale pour l'amélioration de la conception thermo-aéraulique des bâtiments en climat tropical. **V<sup>ième</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Lyon, mai 2001.
- [CI4] Lauret P., Boyer H., Mara T., Garde F., Sero-Guillaume O. 2001. Algorithmes génétiques appliqués à la validation en thermique des bâtiments. **V<sup>ième</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, INSA Lyon, mai 2001.
- [CI5] Garde F., Lucas F., Rat C., Gatina J.C. 2001. Conception bioclimatique des logements neufs en climat tropical humide. Présentation d'une approche globale. **CISBat 2001**, 3-4 octobre 2001, Lausanne, Suisse.
- [CI6] Fock E., Lauret A.P., Garde F., Gatina J.C.. 2000. Artificial neural networks for the prediction of cooling loads of HVAC systems : a case study under a tropical climate. **WREC 2000**, Brighton, juillet 2000.
- [CI7] Miranville F., Fock E., Garde F., Hervé P. 2000. Experimental study of the thermal performances of a composite roof including reflective insulation materials in tropical humid climatic conditions. **WREC 2000**, Brighton, juillet 2000.
- [CI8] Garde F., Boyer H., Célaire R., Seauve L. 1999. Building design in tropical climates. Elaboration of the ECODOM standard in the french tropical islands. **ISES 99', International Solar Energy Society**, Jerusalem, Israel, juin 1999.
- [CI9] Garde F., Lucas F., Boyer H., Brau J. 1999. Nécessité de l'approche multimodèle dans la modélisation des systèmes de traitement d'air. **IV<sup>ième</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Montréal, Canada, mai 1999.
- [CI10] Adelard L., Pignolet-Tardan F., Lauret P., Mara T., Garde F., Boyer H. 1998. Sky temperature modelling for building thermal simulation. **WREC 1998, World Renewable Energy Congress**, Florence, Italie, septembre 1998.
- [CI11] Lucas F., Mara T., Garde F., Boyer H. 1998. A comparison between CODYRUN and TRNSYS simulation codes for thermal building behaviour. **WREC 1998, World Renewable Energy Congress**, Florence, Italie, septembre 1998.
- [CI12] Adelard L., Garde F., Pignolet-Tardan F., Boyer H., Gatina J.C. 1997. Weather sequences for predicting HVAC system behavior in residential units located in tropical climates. **International Building Performance Simulation Association, IBPSA**, Prague, République Tchèque, septembre 1997, vol. 3, p.49-56.
- [CI13] Adelard L., Garde F., Pignolet F., Boyer H., Gatina J.C. 1997. Weather data generator for humid climates. **International Thermal Energy & Environment Congress (ITEEC)**, 9-12 juin 1997, Marrakesch, Maroc.
- [CI14] Lucas F., Garde F., Boyer H., Gatina J.C. 1997. Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de système de traitement d'air. **III<sup>ième</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Toulouse, Mai 1997.

- [CI15] Boyer H., Garde F., Lauret A.P., Brau J. 1995. Description induced by modelisation methods in the case of building thermal simulation. **International Building Performance Simulation Association, IBPSA**, Madison U.S.A, p.64-70.
- [CI16] Garde F., Boyer H., Pignolet-Tardan F., Lucas F., Brau J. 1997. Multiple model approach and experimental validation of a residential air-to-air heat pump. In proceedings of **CLIMA 2000**, Bruxelles.
- [CI17] Garde F., Adelard L., Boyer H., Célaire R. 1997. Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings. In proceedings of **CLIMA 2000**, Bruxelles.
- [CI18] Pignolet-Tardan F., Depecker P., Garde F., Adelard L., Gatina J.C. 1997. Modelling of the heat island generated by an urban unit. **International Building Performance Simulation Association, IBPSA**, Prague, République Tchèque, vol. 3, p.41-48.
- [CI19] Adelard L., Garde F., Boyer H. 1997. Génération de séquences météorologiques pour des applications dans l'habitat. **III<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Toulouse.
- [CI20] Garde F., Boyer H., Brau J., Gatina J.C. 1995. Validation expérimentale d'un code de modélisation thermique de bâtiments (CODYRUN). Une application en climat tropical humide. **II<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Thermique des systèmes à température modérée. Sherbrooke, Montréal, Canada, p. 197-202.

#### **Congrès nationaux avec actes publiés (5)**

- [CN1] Bastide A., Boyer H., Lauret P., Lucas F., Garde F. 2001. Intégration à TRNSYS du noyau de CODYRUN, code de simulation thermo-aéraulique de bâtiments : le Type 59. **4<sup>ème</sup> séminaire TRNSYS-EES francophone**, Lyon, Septembre 2001.
- [CN2] Mara T., Boyer H., Garde F., Adelard L. 2000. Proposition et application d'une technique d'analyse de sensibilité en thermique du bâtiment. Congrès **SFT 2000** (Société Française des Thermiciens), Lyon mai 2000, pp. 795-800.
- [CN3] Miranville F., Fock E., Garde F., Adelard L. 2000. Etude expérimentale d'une toiture composite incluant un isolant mince réfléchissant en climat tropical humide. Congrès **SFT 2000** (Société Française des Thermiciens), Lyon mai 2000, 273-278.
- [CN4] Mara T., Mamode M., Lauret P., Garde F. 2000. Validation expérimentale des logiciels de simulation du comportement thermique du bâtiment: l'apport des outils d'analyse spectrale, **International Building Performance Simulation Association, IBPSA France**, 2000, pp. 143-150.
- [CN5] Mara T., Adelard L., Lauret P., Garde F. 1998. Présentation d'une application dédiée à la validation de codes de simulation thermique de bâtiment. I.B.P.S.A. '98, **International Building Performance Simulation Association**, Sophia-Antipolis, France, 10-11 décembre 1998.

#### **Congrès sans actes ou avec actes à diffusion restreinte (12)**

- [CN6] Garde F. 2000. Présentation des résultats de l'évaluation technique des opérations « La Découverte et La Trinité ». **Compte rendus des Journées ECODOM 15-16 novembre 2000**.
- [CN7] Garde F. 2000. Les nouvelles solutions techniques mises en œuvre dans les opérations neuves et la réhabilitation. **Compte rendus des Journées ECODOM 15-16 novembre, novembre 2000**.
- [CN8] Miranville F., Garde F., Adelard L., Lucas F., Mara T., Boyer H. 2000. Présentation d'une plate-forme expérimentale dédiée à la thermique du bâtiment. **Journées de la recherche « Energie et Environnement »**, Saint-Denis de La Réunion, 15-18 septembre 2000.



- [CN9] Lucas F., Adelard L., Mara T., Garde F., Fock E. 2000. Combinaison d'une méthode expérimentale et numérique afin de résoudre des problèmes d'humidité et de confort en climat tropical humide. **Journées de la recherche « Energie et Environnement »**, Saint-Denis de La Réunion, 15-18 septembre 2000.
- [CN10] Boyer H., Garde F., Adelard L., Lucas F., Fock E., Miranville F., Youne A.. 2000. Les méthodes de modélisation et de simulation en thermique des bâtiment à l'Université de La Réunion. **Journées de la recherche « Energie et Environnement »**, Saint-Denis de La Réunion, 15-18 septembre 2000.
- [CN11] Garde F. 2000. Les économies d'énergies : Cas de la thermique de l'habitat. Journées Energie Environnement 17 octobre 2000. Conférence-débat « Quelles énergies renouvelables demain à La Réunion ? »
- [CN12] Garde F., Tessier J. 1998. Réalisation d'une maison ECODOM. Poster présenté sur le stand EDF dans le cadre du 10<sup>ème</sup> salon de la maison, mai 1998.
- [CN13] Gatina J.C., Boyer H., Garde F., Mara T., Hervé P. 1997. Modélisation des bâtiments et application à la conception bioclimatique de l'habitat. **Journées scientifiques de l'Institut de Maîtrise de l'Energie (I.M.E.)**, Université d'Antananarivo, Madagascar, 8-13 décembre 1997.
- [CN14] Garde F. Célaire, R. 1997. Animation de l'atelier ECODOM aux tables rondes des journées de Barbizon..Journées du Club de Barbizon, Saint-Leu, Ile de la Réunion, 5-6 décembre 1997.
- [CN15] Garde F., Boyer H., Brau J., Gatina J.C. 1995. Présentation du code de calcul CODYRUN et de sa validation en climat tropical humide. **Journées d'étude S.E.E. (Société des Electriciens et des Electroniciens)**, thème « Maîtrise de l'Energie », 6-7 juin 1995 (Ile de la Réunion).
- [CN16] Garde F. 1995. La réglementation thermique dans les Départements d'Outremer. **Journée de travail sur l'élaboration du label ECODOM**, Saint-Leu, Ile de la Réunion, mars 1995.
- [CN17] Garde F. 1994. La réglementation thermique en métropole et son inadéquation dans les Départements d'Outremer. **Conférence, 6<sup>ème</sup> Salon de la Maison**, Saint-Denis, Ile de la Réunion, mai 1994.

### **Rapports de contrat (22)**

- [RC1] Adelard L., Garde F., Martin J.F. 2001. Evaluation du comportement acoustique de logements sociaux. Convention GTOI - IUT de Saint-Pierre.
- [RC2] Adelard L., Miranville F., Garde F. 2001. Appui technique : Opération « Fleur d'Hibiscus » SEMPRO - Analyse de la conformité ECODOM. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC3] Boyer H., Adelard L. Garde F., Bastide A. 2001. Analyse du projet Teelock : Utilisation du logiciel CODYRUN pour l'amélioration d'une opération de logements sociaux à l'Ile Maurice. Convention Mauritius Research Council/Université de La Réunion.
- [RC4] Lauret P., Mara T. , Garde F. 2001. Opération SIDR « Camélias » et « Chaudron ». Réception des travaux liés aux aspects thermiques ECODOM pour deux opérations de réhabilitation. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC5] Mara T, Fock E., Garde F. 2001. Analyse des projets de Lycées Tampon III et Sainte-Suzanne pour appui commission technique sur les aspects MDE. Convention Région Réunion/Université de La Réunion.
- [RC6] Garde F. Boyer H. Mara T. 2000. Opération « Phare 1 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC7] Boyer H., Garde F., Mara T. 2000. Opération « Phare 2 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC8] Garde F. 2000. Opération « Tamarin 2 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM Convention EDF/ Université de La Réunion.

- [RC9] Garde F., Boyer H., Adelard L. 2000. Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM à l'île de La Réunion. Note de synthèse LGI/ IPSOS O.I.. Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, novembre 2000, 20 p.
- [RC10] Garde F., Adelard L., Mara T., Poudroux P., Boyer H. 2000. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. Rapport intermédiaire : opération « La Découverte ». Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, octobre 2000, 60 p.
- [RC11] Garde F., Miranville F. Boyer H., Lauret P., Mara T. 2000. Brasseurs d'air dans les D.O.M. Synthèse de l'offre commerciale à l'île de La Réunion. Convention C.S.T.B./Université de La Réunion.
- [RC12] Garde F., Pignolet-Tardan F, Mara T., Boyer H. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. Rapport intermédiaire : opération « La Trinité ». Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion, novembre 1998, 82 p.
- [RC13] Lucas F., Garde F., Adelard L. 2000. Etude de la condensation : Opération SHLMR « Ligne des 500 », Plaine des Palmistes. Convention SHLMR/LGI, septembre 2000.
- [RC14] Lucas F., Adelard L, Garde F., Boyer H. 2000. Expertise des logements dans les hauts de La Réunion. Dégradation des bâtiments dues aux problème de condensation. Convention SODEGIS/LGI.
- [RC15] Garde F., Miranville F. 2000. Rapport d'analyse de la conformité ECODOM « Opération Phéni-Hibiscus » SHLMR. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC16] Garde F. Fock E., Mara T. 1999. Prestations d'étude pour l'analyse de projets de maison individuelles Bourbon Bois. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC17] Garde F., Boyer H., Mara T. 1999. Application des prescriptions ECODOM à deux opérations de réhabilitation : opérations « Chaudron et Camélias » SIDR. Convention EDF/ Université de La Réunion.
- [RC18] Garde F. 1999. Rapport d'analyse de la conformité ECODOM : opération "Portland" SHLMR Saint-Pierre. Convention EDF/Université de La Réunion.
- [RC19] Boyer H., Garde F., Mara T., Lucas F., Adelard L. 1996 "Rapport de fin de convention cellule expérimentale de mesure en environnement extérieur pour validation du logiciel CODYRUN". Convention ADEME - Université de la Réunion.
- [RC20] Garde F., Boyer H., Adelard L., Gatina J.C. 1996. Rapport Label Ecodom. Validation des prescriptions du document du label. Application à des logements types à l'île de la Réunion. Rapport de recherche. Convention EDF Direction des DOM-Université de la Réunion, 1996, 140 p.
- [RC21] Garde F., Vuillemin L., Gatina J.C. 1994. Caractérisation des performances thermiques de chauffe-eaux bi-énergie. Convention EDF Ile de la Réunion - Université de la Réunion.
- [RC22] Garde F., Vuillemin L., Gatina, J.C. 1994. Caractérisation des performances thermiques du complexe de toiture Bardeau/Sisalation. Rapport de recherche, convention ADEME-Université de la Réunion, 43 p.

### Rapports et notes internes (6)

- [NI1] Garde F. 2001. Maîtrise de l'Energie dans les projets de bâtiment de l'Université de La Réunion. Note à intégrer dans les pré-programmes et programmes de construction des nouveaux bâtiments du Contrat de Plan Etat/Région. Note interne, Université de La Réunion, juin 2001, 13 p.
- [NI2] Lucas F., Garde F. 2001. Projet : IUT site pilote en énergies renouvelables, Rapport interne, IUT Département Génie Civil, juin 2001.
- [NI3] Garde F., Boyer H., Lucas F., Adelard L. 2001. Politique de recherche 2001-2005, Equipe Génie Civil Thermique de l'Habitat, Université de La Réunion, Rapport interne des activités de recherche de l'équipe Génie Civil, juin 2001.

- [NI4] Garde F. 1998. Dossier de demande de complément de financement pour le premier équipement de l'I.U.T. de Saint-Pierre. Note interne, Université de La Réunion, juin 1998.
- [NI5] Garde F. 1996. Description du site expérimental de l'Hermitage. Document interne, Université de la Réunion.
- [NI6] Garde F. 1994. Analyse technico-économique de chauffe-eaux bi-énergie. Rapport de synthèse. Document interne EDF Ile de la Réunion, 50 p.
- [NI7] Garde F. 1991-1994. Diagnostics énergétiques de bâtiments tertiaires à l'Ile de la Réunion : Aéroport International Rolland Garros Saint-Denis, D.D.A.S.S Saint-Denis, Station thermale de Cilaos, C.A.F. Saint-Pierre, Ghanty Royal Saint-Denis et Saint-Louis, Gold Center Saint-Denis, Ets ADAME Saint-Denis. Rapports d'études, BET INSET.

#### Publications récentes en cours d'évaluation

- [S1] Mara T. A., Boyer H., Garde F. 2001. Parametric sensitivity analysis in thermal building using a new method based on spectral analysis. Soumis à **Transactions of ASME** (American Society of Mechanical Engineers), **International Journal of Solar Energy Engineering**, mai 2001.
- [S2] Garde F., Adelard L., Fock E., Mara T. 2001. Experimental validation of passive design specifications used in low-cost housing under tropical climates. Soumis à **Building and Environment**, août 2001
- [S3] Garde F., Lauret A.P., Bastide A., Mara T., Lucas F. 2001. Development of a nondimensional model for estimating the cooling capacity and electric consumption of single speed split-systems incorporated in a building thermal simulation program, Soumis à **ASHRAE Transactions** (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers), septembre 2001.

#### Mémoires

- |  |  |
|--|--|
| Thèse  | Garde F. Validation et développement d'un modèle thermo-aéraulique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes.<br>Thèse Sci. : Université de La Réunion, juillet 1997.   |
| D.E.S.S. C.A.A.E.,<br>I.A.E. Lyon III            | Garde F. Faisabilité pour le montage d'une entreprise d'insertion liée aux métiers de la pierre pour l'Ile de La Réunion.<br>Mémoire de DESS, Certificat d'Aptitude à l'Administration des Entreprises, Institut d'Administration des Entreprises de Lyon III, septembre 1994, 64 p. |
| Travail de fin d'étude<br>École Centrale de Lyon | Garde F. Évaluation de polymères à cristaux liquides (LCP), renforcés fibre de carbone.<br>Travail de fin d'étude de l'École Centrale de Lyon, effectué à l'Aérospatiale Toulouse, au service Matériaux - Procédés, avril-juin 1989.   |

**Annexe B**

**Encadrement doctoral  
Participation à des jurys**

## ENCADREMENT DE THÈSES

### Soutenues

**Thierry Mara : (taux d'encadrement : 50%)**

*Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéroulque du bâtiment : Proposition de nouveaux outils d'aide à la validation.*

Thèse de l'Université de La Réunion soutenue en décembre 2000.

Financement : bourse régionale d'allocation doctorale.

Thierry Mara est actuellement ATER au Département de Physique Mécanique, Université de La Réunion.

### En cours

**Franck Lucas : (taux d'encadrement : 60%)**

*Développement et validation des échanges thermo-hydriques dans les bâtiments ; Influence de la condensation et des systèmes de traitement d'air couplés au bâtiment.*

Thèse Université de La Réunion, soutenance en décembre 2001.

Financement : autofinancement (PRAG, Département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre).

**Frédéric Miranville (taux d'encadrement : 60%)**

*Modélisation et validation de modèles de parois complexes incluant des produits minces réfléchissants.*

Soutenance prévue en décembre 2002

Financement : bourse nationale d'allocation doctorale.

**Eric Fock (taux d'encadrement : 30%)**

*Modélisation hybride des transferts thermo-aéroulques dans le bâtiment et des systèmes de climatisation*

Soutenance prévue en avril 2003.

Financement : Bourse CIFRE EDF.

**Alain Bastide (taux d'encadrement : 50%)**

*« Contribution au développement de modèles dégradés au départ d'un code de champ pour intégration à un code de simulation thermo-aéroulque de bâtiments en climatisation active et passive »*

Soutenance prévue pour décembre 2004 (début thèse : septembre 2001).

Financement : Bourse régionale d'allocation doctorale.

### ENCADREMENT DE DEA :

L'Université de La Réunion est cohabilitée avec l'Université de Nancy I et l'Ecole Nationale Polytechnique de Lorraine (INPL) pour la délivrance du diplôme de DEA Mécanique-Energie. Dans ce cadre, nous intervenons dans les enseignements d'une partie du tronc commun et accueillons des stagiaires pour leur stage de fin de DEA.

J'ai personnellement encadré 7 stagiaires de DEA dont 5 à 100 %. Le taux d'encadrement est indiqué seulement pour les étudiants encadrés partiellement (Ted Soubdhan et Pascal Poudroux).

Sur les 5 DEA encadrés à 100%, deux sont actuellement en thèse dans notre équipe (Alain Bastide et Frédéric Miranville), Franck Lucas soutient sa thèse en décembre prochain (décembre 2001) et Thierry Mara est actuellement A.T.E.R. à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de La Réunion.

**Alain Bastide (2001)**

*Réalisation d'une soufflerie numérique en vue de la détermination du champ des vitesses dans un bâtiment. Proposition de lois de corrélations de coefficients de réduction de vitesse intérieure sur des configurations types de bâtiment.*

**Françoise Vienne (2001)**

*Détermination d'un indice de confort thermique adapté au climat tropical humide et intégration dans un code de simulation. Proposition d'une méthodologie de validation expérimentale.*

**Frédéric Miranville (1999)**

*Mise en place d'une plateforme expérimentale en vue de la détermination de performances thermiques de composants de toiture.*

Ce sujet se poursuit actuellement en thèse (bourse MRT) depuis septembre 1999.

**Ted Soubdhan (1999)** Encadrement 30 %.

*Validation du code CODYRUN dans le cadre de la procédure BESTEST*

Ted Soubdhan bénéficie depuis 2000 d'une bourse de thèse ADEME au GRER, Université Antilles Guyane.

**Pascal Poudroux (1998)** Encadrement 30%

*Expérimentation d'un habitat prototype et confrontations avec le code de calcul CODYRUN.*

**Franck Lucas (1996)**

*Modélisation et validation expérimentale de systèmes de traitement d'air.*

Ce sujet se poursuit en thèse depuis septembre 1996.

**Thierry Mara (1996)**

*Validation expérimentale d'un code de calcul en thermique des bâtiments.*

Ce sujet s'est poursuivie en thèse soutenue en décembre 2000.

## PARTICIPATION À DES JURYS DE THÈSE

### Franck Lucas, décembre 2001

#### Composition du jury :

|               |                   |  |
|---------------|-------------------|--|
| Président :   | P. HERVE          | Professeur, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> ) |
| Rapporteurs : | O. SERO GUILLAUME | Directeur de Recherche CNRS, LEMTA-INPL                    |
|               | H. BOYER          | Professeur, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> ) |
| Examineurs :  | F. GARDE          | MCF, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> )        |
|               | J. LEBRUN         | Professeur, Université de Liège                            |
|               | M. BERNIER        | Professeur, Ecole Polytechnique de Montréal                |

### Thierry MARA, décembre 2000

#### Composition du jury :

|               |                   |  |
|---------------|-------------------|--|
| Président :   | P. HERVE          | Professeur, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> )   |
| Rapporteurs : | O. SERO GUILLAUME | Directeur de Recherche CNRS, LEMTA-INPL                      |
|               | J. BRAU           | Professeur, INSA de Lyon (60 <sup>ième</sup> )               |
| Examineurs :  | H. BOYER          | MCF HDR, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> )      |
|               | F. GARDE          | MCF, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> )          |
|               | M. MAMODE         | MCF, Université de la Réunion (61 <sup>ième</sup> )          |
|               | J.C. GATINA       | Professeur, Université de la Réunion (60 <sup>ième</sup> )   |
|               | M. DUPONT         | Professeur, Université Antilles Guyane (62 <sup>ième</sup> ) |

## PARTICIPATION À DES JURYS DE DEA

J'ai participé aux jurys de 11 DEA : 7 correspondent aux DEA précités. Les quatre autres DEA sont présentés ci-dessous :

**Jean-Pascal Grondin (2001)**

*Revalorisation du biomasse et modélisation d'un système de co-génération*

Cet étudiant poursuit ses travaux de recherche en convention CIFRE avec un industriel local.

**S. Abelard (1999)**

*Validation d'un code de calcul en thermique de bâtiments : contribution de l'analyse temps fréquence.*

**F. Christen (1999)**

*Perméamètre à air pour des mesures in situ.*

**D. Calogine (1997)**

*Etude et réalisation d'un capteur de mesure de température équivalente de ciel.*

Cet étudiant est actuellement en thèse au LEMTA (Nancy), Bourse MRES 1997

Annexe C

Financement  
Contrats de Recherche

| Responsable (s)  | Titre du projet   | Financier                                 | Montant (kF H.T)           |
|--|---|---|----------------------------|
| <b>2002</b>  |   |   |                            |
| Garde F.<br>Lucas F.   | Projet I.U.T. Site Pilote en Energies Renouvelables   | Région Réunion<br>ADEME<br>Europe (FEDER) | 5 900 kF                   |
| Boyer H.<br>Garde F.   | Amélioration du logiciel CODYRUN en vue de l'utilisation par les professionnels du bâtiment   | Région Réunion<br>ADEME<br>Europe         | 1 000 kF                   |
| Garde F.<br>Boyer H.   | Amélioration du confort thermique en climat tropical dans les bâtiments en climatisation passive. Développement et validation d'un indice de confort thermique adapté au climat tropical humide.  | Secrétariat d'Etat<br>à l'Outre Mer       | 320 kF                     |
| <b>Total 2002 (hors postes en italique : demandes de financement en cours)</b> |   |   | <b>5.9 MF</b>              |
| <b>2001</b>  |   |   |                            |
| Garde F.<br>Lucas F.   | Etude de la condensation : Opération SHLMR « Ligne des 500 », Plaine des Palmistes.   | S.H.L.M.R<br>(Maître d'Ouvrage Social)    | 30 kF                      |
| Garde F.<br>Adelard L.<br>Garde F.   | <i>Evaluation du comportement acoustique de logements sociaux</i><br>Rédaction d'une note de Synthèse sur l'opération expérimentale ECODOM.   | G.T.O.I<br>EDF Réunion                    | 20 kF<br>12.8 kF           |
| Garde F.   | Opération « Phare 1 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM   | EDF Réunion                               | 22.4 kF                    |
| Boyer H.<br>Garde F.<br>Garde F.   | Opération « Phare 2 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM<br>Opération « Tamarin 2 » SEMADER - Analyse de la conformité ECODOM  | EDF Réunion<br>EDF Réunion                | 22.4 kF<br>22.4 kF         |
| Garde F.   | Analyse des projets de Lycées Tampon III et Sainte-Suzanne pour appui commission technique sur les aspects MDE.   | Région Réunion                            | 22.4 kF                    |
| Boyer H.<br>Garde F.   | Analyse du projet Teelock : Utilisation du logiciel CODYRUN pour l'amélioration d'une opération de logements sociaux à l'Ile Maurice.   | Mauritius<br>Research Council             | 22.6 kF                    |
| Garde F.<br>Lucas F.<br>Garde F.<br>Adelard L.<br>Garde F.<br>Lauret A.P.      | Mise en place d'un banc d'essai pour climatiseurs individuels STA-TRON<br>Appui technique : Opération « Fleur d'Hibiscus » SEMPRO - Analyse de la conformité ECODOM<br>Opération SIDR « Camélias » et « Chaudron ». Réception des travaux liés aux aspects thermiques ECODOM pour deux opérations de réhabilitation | ADEME<br>EDF Réunion<br>EDF Réunion       | 170 kF<br>22.4 kF<br>24 kF |
| <b>Total 2001</b>  |   |   | <b>371.4 kF</b>            |



| Responsable (s)      | Titre du projet   | Financier  | Montant (F H.T) |
|----------------------|---|--|-----------------|
| <b>2000</b>          |   |  |                 |
| Garde F.             | Synthèse des résultats de la Rex ECODOM lors des journées ECODOM Novembre 2000  | EDF Réunion  | 20.8 kF         |
| Boyer H.<br>Garde F. | Expertise des logements dans les hauts de La Réunion. Dégradation des bâtiments dues aux problème de condensation.            | SODEGIS<br>(Maître d'Ouvrage Social)                     | 156 kF          |
| Garde F.             | Rapport d'analyse de la conformité ECODOM « Opération Phéni-Hibiscus » SHLMR  | EDF Réunion  | 12.8 kF         |
| Garde F.             | Brasseurs d'air dans les D.O.M.. Synthèse de l'offre commerciale à l'île de la réunion, 2000.                                 | C.S.T.B.   | 40 kF           |
| Garde F.             | Analyse projet Bourbon Bois "Alamanda"  | EDF Réunion  | 3.2 kF          |
| Garde F.             | Rehabdom Phase 2  | EDF Réunion  | 60 kF           |
| <b>Total 2000</b>    |   |  | <b>292.8 kF</b> |
| <b>1999</b>          |   |  |                 |
| Garde F.             | Analyse ECODOM de maisons TROPIC Construction   | EDF Réunion  | 38.4 kF         |
| Garde F.             | Analyse projets Miserez - ECODOM  | EDF Réunion  | 9.6 kF          |
| Garde F.             | Prestations de mesure villa Penel et Mizerez  | EDF Réunion  | 16 kF           |
| Mara T.<br>Garde F.  | Appui technique : Opération « Ziléas » - Analyse de la conformité ECODOM  | EDF Réunion  | 19.2 kF         |
| Garde F.             | Prestation d'étude Projets Bourbon Bois - ECODOM  | EDF Réunion  | 19.2 kF         |
| Boyer H.<br>Garde F. | Rehabdom Phase 1  | EDF Réunion  | 90.3 kF         |
| Garde F.             | Rapport d'analyse de la conformité ECODOM :opération "Portland" SHLMR Saint-Pierre  | EDF Réunion  | 16 kF           |
| Boyer H.<br>Garde F. | Projets lycées  | Région Réunion   | 16 kF           |
| <b>Total 1999</b>    |   |  | <b>224 kF</b>   |
| <b>1998</b>          |   |  |                 |
| Garde F.<br>Boyer H. | Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM à l'île de La Réunion, 1997-2000.                    | DDE-Réunion.<br>SPIOM Secteur Pilote Innovation Outremer | 374 kF          |
| Garde F.<br>Mara T.  | Appui technique pour expertise de logements ECODOM en Guadeloupe juillet 98   | BET Sunstice Guadeloupe                                  | 68 kF           |
| Garde F.<br>Boyer H. | Réalisation d'une maison ECODOM. Poster présenté sur le stand EDF dans le cadre du 10 <sup>ème</sup> salon de la maison, 1998 | EDF Réunion  | 18 kF           |
| <b>Total 1998</b>    |   |  | <b>460 kF</b>   |
| <b>1997</b>          |   |  |                 |
| Boyer H.<br>Garde F. | Mesures expérimentales : Société Crête d'Or   | INSET  | 15 kF           |
| <b>Total 1997</b>    |   |  | <b>15 kF</b>    |
| <b>1996</b>          |   |  |                 |
| Boyer H.<br>Garde F. | Validation des prescriptions du document du label. Application à des logements types à l'île de la Réunion.                   | EDF Direction de DOM                                     | 75 kF           |
| <b>Total 1996</b>    |   |  | <b>75 kF</b>    |

## Annexe D

# Principales publications

**ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LECTURE :**

**Thème : Modélisation des systèmes et des transferts d'humidité :**

Garde F., Lucas F., Boyer H., Brau J. 2001. Multiple model approach of a residential heat pump for integration in building thermal simulation code and comparison with experimental results. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, 107 (1), n°4412.

Lucas F., Adelard L., Garde F., Boyer H. 2001. Study of moisture in buildings for hot humid climates. Manuscript accepté à **Energy and Buildings**, septembre 2001

**Thème : Conception thermo-aéraulique des bâtiments**

Garde F., Boyer H., Célaire R. 2001. Bringing simulation to implementation : Presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. **Solar Energy** 71 (2):109-120.

Garde F., Boyer H., Gatina J.C. 1999. Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings. **Building and Environment** 34 (1):71-84.

**Thème : Méthodologie de validation et validation expérimentale**

Lauret A.J.P., Mara T. A., Boyer H., Adelard L., Garde F. 2001. A validation methodology aid for improving a thermal building model : how to account for diffuse radiation in a tropical climate. **Energy and Buildings** 33 (2001):711-718.

Mara T., Garde F., Boyer H., Mamode M. 2001. Empirical validation of a solar test cell. **Energy and Buildings** 33 (6):589-599.

**COMMUNICATIONS - CONGRÈS INTERNATIONAUX, AVEC ACTES PUBLIÉS**

**Thème : Méthodologie de validation et validation expérimentale**

Garde F., Adelard L., Mara T., Lucas F., Miranville F. 2001. Implementation and experimental validation of passive design principles used in naturally ventilated buildings under humid tropical climates. In proceedings of **CLIMA2000**, Naples, 13-15 septembre 2001.

Garde F., Boyer H., Brau J., Gatina J.C. 1995. Validation expérimentale d'un code de modélisation thermique de bâtiments (CODYRUN). Une application en climat tropical humide. **II<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Thermique des systèmes à température modérée. Sherbrooke, Montréal, Canada, p. 197-202.

**Thème : Modélisation des systèmes et des transferts d'humidité :**

Garde F., Lucas F., Boyer H., Brau J. 1999. Nécessité de l'approche multimodèle dans la modélisation des systèmes de traitement d'air. **IV<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois**, Montréal, Canada, mai 1999.

**PUBLICATIONS SOUMISES**

Mara T. A., Boyer H., Garde F. 2001. Parametric sensitivity analysis in thermal building using a new method based on spectral analysis. Sousmis à **Transactions of ASME** (American Society of Mechanical Engineers), **International Journal of Solar Energy Engineering**, mars 2001.

# Multiple Model Approach of a Residential Heat Pump for Integration in a Building Thermal Simulation Code and Comparison with Experimental Results

François Garde, Ph.D.  
Associate Member ASHRAE

Franck Lucas

Harry Boyer, Ph.D.

Jean Brau, Ph.D.  
Associate Member ASHRAE

## ABSTRACT

*The modeling of HVAC systems and their interaction with the building is necessary to evaluate the energy consumption of a building. This modeling is all the more important since these systems are designed for extreme conditions and often work at 60% of their maximum power with a significant number of on-off cycles. Thus, the hourly models may become inaccurate in predicting the energy consumption of the system. This paper deals with the usefulness of "the multiple model approach" in the modeling of air-conditioning systems (in this case, we have focused on the modeling of a split system) and the integration into a building simulation code. Three models are presented, characterized by different complexities of modeling and different time steps. The objective is to compare an hourly time step model to a reduced time step model, enabling consideration of the control and the dynamic behavior of the system.*

*An experimental validation was undertaken in order to compare the accuracy of each model. The data acquisition system and the test cell, located on the French island of La Réunion in the Indian Ocean, are described.*

*The results show that, for low part-load factors, short time step dynamic models predict energy consumption more accurately than hourly time step models.*

## INTRODUCTION

The main problem concerning demand side management in tropical islands, such as the French island of La Réunion (located 400 km east of Madagascar in the Indian Ocean), is that the means of electrical production is restricted. The power supply demand is not great enough to justify a cost-efficient nuclear power plant, and thus, the means of production is more

expensive. The average production cost per kWh is greater than the selling price (the selling price being the same as in mainland France). Under these conditions, the air conditioning of buildings is a growing problem because air-conditioning systems consume a large amount of energy and generate investments in the power supply. In addition, the buildings in general are of poor thermal design, which generate high cooling loads. The large population increase in the tropical islands, the rise in the living standards, and the decreasing cost of air-conditioning units constitute a real energy problem also. All these factors lead to the conclusion that for new building projects (even for refurbishment projects), a better modeling of the interaction between the building and the HVAC systems will allow the building designers to make the best choice between different passive cooling solutions or different solutions of HVAC systems and to simulate the accurate impact of each solution on the global energy consumption of the building.

The modeling and simulation of HVAC systems and their interaction with the building are necessary for the evaluation of a means for reducing energy consumption. This modeling is all the more important because these systems are designed for extreme conditions and often work at 60% of their maximum power with a large number of on-off cycles. Thus, the steady-state modeling may inaccurately predict the energy consumption of the cooling system. Our studies focus on the modeling of a residential air-to-air split system heat pump, which is the most commonly used air-conditioning system found in tropical islands. The problem in heat pump modeling is the definition of the accuracy level of the model. To what degree of complexity can the heat pump be modeled in order

---

François Garde is head of the Civil Engineering Department, Franck Lucas is a researcher, and Harry Boyer is an assistant professor at the Laboratoire de Génie Industriel, Université de La Réunion, Saint Pierre, France. Jean Brau is a professor at L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France.

to further integration into thermal and airflow simulation software?

Generally, HVAC systems, especially domestic air conditioners, are only considered in either a very simplified way or in an elaborated one. Irving (1986) and Hensen (1993) reported that there is a large amount of simulation models, all of varying degrees of complexity, available to the industry. These programs range from very simple steady-state heating or cooling loads, used on programmable calculators, to very detailed simulation programs that require powerful computers. It is obvious that no single program can satisfy the many needs of the engineer at every stage of the design.

Another point to be considered is the time step of the calculation programs. It is often one hour, which is too long when taking into account HVAC system control. In fact, their time constants are much shorter than the building time constants. It is apparent that optimal cooling control strategies require a dynamic model for predicting the performance characteristics of the overall system (Crawford 1987). Finally, the cooling coil of the indoor unit of the split system is one of the key components in the air-conditioning system. The main difficulties are found in wet and/or transient regimes and the performance of the whole system (and thus, the accuracy of the model) depends on a detailed model of the cooling coil.

## MODELING REVIEW

With regard to heat pump simulation, it appears that the different models can be broadly classified as steady-state and dynamic simulations. Wesby et al. (1988) reviewed various mathematical models of mechanical vapor-compression heat pumps from 1975 to 1988, with particular emphasis on the basis and end-use.

It appears that detailed steady-state models are often used to study variations in system or component configuration in order to identify optimal values of parameters that dictate the performance of the system. They are very helpful in optimizing the design of air-conditioning equipment. The component approach is often used by researchers because of their strong coupling (Armand et al. 1990). Usually, authors have developed a numerical model to determine the steady-state performance of heat pumps for specific source and sink conditions and specific components. The model is based on simple models of the components of the heat pump. ORNL developed a mathematical model (Ellison and Creswick 1978) to analytically evaluate the variation in performance obtained from changes in the heat pump components. This physically based model was further developed and combined with an optimization program (Rice et al. 1981). This combination allowed the simultaneous optimization of selected design variables, while constraining the other parameters within set limits, to calculate the maximum heating efficiency coefficient of performance (COP).

When considering the coupling with a thermal simulation software, Loveday and Ewars (1990) developed a heat pump simulation program in order to relate the hourly thermal build-

ing load to the corresponding electricity input function of the heat pump COP. The hourly heating energy to be supplied to the building is obtained from ESP (Clarke 1985). The heat pump model is a steady-state model that gives correlations between the heat pump COP to external and ambient temperature and takes into account motor/compressor inefficiencies, thermal/mechanical losses through heat transport, and defrosting performance.

These steady-state models are generally too detailed for our needs. Other investigators have worked on steady-state models based on experimental data and manufacturers' data (Allen and Hamilton 1983; Gluck and Pollack 1978; Stan 1993). With the knowledge of different set points and different experimental conditions, a model based on polynomial laws relating the cooling capacity or the power consumption to the outdoor and indoor temperature can be elaborated.

Transient perturbations and dynamic regimes can be simulated to analyze the start-up process, the defrost-cycle, and rapidly varying operating conditions. The aim of these models is to study the variation of a working fluid mass and thermodynamic state distributions within the system from known initial conditions, where the system operating conditions are changed. Some researchers have developed precise dynamic models (Chi and Didion 1982; Mulroy 1986; MacArthur and Grald 1987; Sami et al. 1987). These models range from lumped parameters (Mulroy 1986; Sami et al. 1987) to mathematical models based on a multi-node or distribution approach (MacArthur and Grald 1987). These models tend to be complex, require powerful computers, and do not readily yield physical insight into the variables affecting the system performance. However, they do allow the user to find detailed information (temperature, pressure, etc.) in the system during the transient start-up process.

Other investigators (Mulroy and Didion 1985) have suggested a two-time constant model to monitor the physical phenomena responsible for start-up losses. The first time constant monitors capacity delay in relation to the mass of the heat exchanger. The second time constant monitors a very high, but rapidly decreasing, initial capacity that is produced by the time lag for the refrigerant to be pumped from the evaporator throughout the system. This model is very accurate during the start-up process.

Other investigators have hypothesized that during start-up, the system capacity could be modeled as a first-order system (single-time constant) (Bullock et al. 1983; Goldsmith et al. 1980; Murphy and Goldsmith 1979; O'Neal and Katipamula 1991, 1993; Katipamula and O'Neal 1991). Experimental data from Murphy and Goldsmith (1979) show good correlation between a single time constant model and data from a heat pump. We also verified the hypothesis ourselves and found a time constant of 2 min. Murphy and Goldsmith found time constants for cooling mode operations ranging from 0.32 to 0.47 min for a heat pump and an air conditioner, respectively. O'Neal and Katipamula (1993) found a time constant of more than two minutes for a heat

pump operating in cooling mode. The differences in time constants, from 0.4 to 2 min, may be significant if the fraction on-time is low (close to 10%). In this case, the start-up conditions are most important for the evaluation of the energy consumption of the system because it never reaches its nominal state. Another important assumption made by Goldsmith et al. (1980) and O'Neal and Katipamula (1991) was the constant power at start-up. This assumption appears to be reasonable. While there is an initial surge in power during the few seconds after start-up, the power overall, however, is relatively constant during the start-up period.

When considering the coupling effects of cooling and dehumidifying on a cooling coil, several authors have proposed different models of a coil in steady-state and/or transient conditions. Hirsch (1982) considers that the moisture condensation on cooling coils is simulated by characterizing the coils by their bypass factors and solving the bypass relation with the system moisture balance in steady-state conditions. Xin Ding et al. (1990) have worked on different models of a cooling coil in steady-state and transient conditions and in dry or wet regimes. These models are based on the NTU method and on the determination of the efficiency of the coil in wet and dry regimes. The dynamic model of the coil is taken to be a first order model.

## THE SIMULATION CODE AND THE INTEGRATED EQUATIONS FOR HVAC SYSTEMS

### An Overview of the Building Thermal Simulation Code

The code used is a thermal multizone software integrating both natural ventilation and moisture transfers (Boyer et al. 1996). Its main characteristic is that it has a multiple model structure (Boyer et al. 1998), which enables the choice of a wide range of models of heat transfer and meteorological data reconstitution. The multiple model approach allows the designer to use the code for design purposes (simple models) and even for research purposes (complex models) (Garde et al. 1999). An experimental validation of the code was implemented in outdoor test cells to verify the accuracy of the model (Garde 1997).

Concerning the calculation, the main parts include the airflow model (pressure model covering wind, thermal buoyancy, and large openings), the thermal model, and the moisture transfer model. For the study presented in this paper, the last two models have been modified by keeping the same multiple model concept, allowing different levels of air-conditioning system modeling.

### Summary of Thermal and Moisture Transfer Models

By considering usual assumptions as one-dimensional heat conduction in walls, well-mixed air volumes, and linearized superficial exchanges, nodal analysis (or lumped capacities analysis) leads to an electrical network. To simplify our discussion, it is supposed that the heat conduction is treated

with a model constituted of a thermal resistance and two capacitors, called the "R2C" model (leading to no internal nodes in walls). The thermal model of the building is obtained by Equations 1-4, defining the thermal balance of inside ( $T_{si}$ ) and outside nodes ( $T_{se}$ ) according to the boundary conditions, the thermo-convective balance equation of dry-bulb air nodes ( $T_{ai}$ ), and the radiative balance equation of the inside mean radiant temperature nodes ( $T_{rm}$ ).

$$C_{si} \frac{dT_{si}}{dt} = h_{ci}(T_{ai} - T_{si}) + h_{ri}(T_{rm} - T_{si}) + K(T_{se} - T_{si}) + \Phi_{swi} \quad (1)$$

$$C_{se} \frac{dT_{se}}{dt} = h_{ce}(T_{ae} - T_{se}) + h_{re}(T_{ae} - T_{se}) + K(T_{si} - T_{se}) + \Phi_{swe} \quad (2)$$

$$C_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = \sum_{j=1}^{Nw} h_{ci}(T_{ai} - T_{si}(j)) + c\dot{Q}(T_{ae} - T_{ai}) + \dot{Q}_{sens} \quad (3)$$

$$0 = \sum_{j=1}^{Nw} h_{ri}A_j(T_{si}(j) - T_{rm}) \quad (4)$$

The separate calculation of moisture balance (induced by air motion between indoor and outdoor zones, latent storage in walls, and room furniture not accounted for) for a zone of specific humidity  $r_s$  leads to a linear system of equations:

$$C \frac{dw}{dt} = \dot{m}_{in}l_v w_{in} - \dot{m}_{out}l_v w + \dot{Q}_{lat} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{sens}$  and  $\dot{Q}_{lat}$ , respectively, are the sensible and latent capacities interacting in the zone, comprising internal loads (such as lighting, occupants) and HVAC systems.

### Integration of the Air Cooling System

At each time step, depending on indoor and outdoor conditions, the HVAC model calculates  $\dot{Q}_{sens}$  and  $\dot{Q}_{lat}$  for the considered zones, values used in Equations 3 and 5. The main difficulty when integrating HVAC system models to building thermal simulation codes is that all the models used (except for the pressure airflow models) are linear models. Consequently, in order to reduce calculation time, the integration of HVAC models must be proceed with coupled equations.

### MODEL DEVELOPMENT

The two prior sections show that detailed heat pump models are often used for the optimization of design variables under steady-state conditions. If the final objective is the study of the system/building coupling with integration of the transient aspects, these kinds of models are not suitable. Mathematical heat pump models based on experimental data will be preferred.

This is why the three models used in the present analysis are based on manufacturers' data. Accurate data are often very difficult to obtain from the manufacturers. Therefore, the method presented allows us to use few manufacturers' data

**TABLE 1**  
**Manufacturers' Data for a Residential Air-to-Air Split System Heat Pump**  
**(nominal values: bold italics)**

| Indoor Dry-Bulb Temperature: 27°C |                                      |                           |      |             |                        |      |    |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------|-------------|------------------------|------|----|
|                                   |                                      | By-Pass Factor = 0.04     |      |             | Air Flow Rate: 110 L/s |      |    |
|                                   |                                      | Wet-Bulb Temperature (°C) | 16   | 18          | 19                     | 20   | 22 |
| Outdoor Temperature (°C)          | Indoor Air Specific Enthalpy (kJ/kg) | 45                        | 55   | 58          | 61.2                   | 65   |    |
| 21                                | Total capacity                       | 3.46                      | 3.65 | 3.72        | 3.78                   | 3.91 |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 3.26                      | 2.88 | 2.67        | 2.45                   | 2.04 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 0.99                      | 1.00 | 1.00        | 1.01                   | 1.02 |    |
| 25                                | Total capacity                       | 3.34                      | 3.54 | 3.64        | 3.72                   | 3.84 |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 3.20                      | 2.84 | 2.65        | 2.44                   | 2.03 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 1.06                      | 1.07 | 1.07        | 1.08                   | 1.09 |    |
| 30                                | Total capacity                       | 3.16                      | 3.37 | 3.48        | 3.59                   | 3.79 |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 3.10                      | 2.78 | 2.59        | 2.41                   | 2.03 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 1.14                      | 1.15 | 1.16        | 1.17                   | 1.19 |    |
| 35                                | Total capacity                       | 2.95                      | 3.18 | <b>3.30</b> | 3.40                   | 3.63 |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 2.95                      | 2.70 | <b>2.52</b> | 2.34                   | 1.98 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 1.23                      | 1.25 | <b>1.25</b> | 1.27                   | 1.28 |    |
| 40                                | Total capacity                       | 2.67                      | 2.77 | 2.95        | 3.18                   | 3.44 |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 2.67                      | 2.52 | 2.38        | 2.25                   | 1.91 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 1.33                      | 1.34 | 1.35        | 1.36                   | 1.38 |    |
| 45                                | Total capacity                       | 2.49                      | 2.56 | 2.69        | 2.93                   | 3.3  |    |
|                                   | Sensible capacity                    | 2.49                      | 2.43 | 2.28        | 2.16                   | 1.86 |    |
|                                   | Power (kW)                           | 1.40                      | 1.40 | 1.41        | 1.42                   | 1.45 |    |

points for HVAC modeling. The HVAC system studied is an R-22 residential air-to-air split system heat pump that is commercially available. The characteristics are shown in Table 1.

This split system operates only in a cooling mode, with a nominal cooling capacity of 3.3 kW. Both indoor and outdoor heat exchangers are of tube-and-plate-fin construction. The compressor is a hermetic piston compressor and the expansion device is a capillary tube.

**Nominal values of the split system:**

- Total cooling capacity: 3.3 kW (11,260 Btu·h<sup>-1</sup>)
- Sensible capacity: 2.52 kW (8600 Btu·h<sup>-1</sup>)
- Electric power: 1.25 kW
- Cooling COP: 2.6

**Model No. 0**

This model is based on the assumption that the supply of the cooling load is obtained by an ideal control loop (no delay between the cooling supply and the time response of the

system). The available output is considered to be the hourly cooling consumption that does not integrate the real characteristics of the HVAC system. We assume that sensible and latent cooling rates are independent factors. The real physical phenomenon is different in that cooling and dehumidifying occur at the same time.

The HVAC system must reach a set temperature and a set humidity. It allows the user to estimate the hourly sensible and cooling load of the building, but does not take into account the characteristics of the system.

In order to estimate the consumption of electricity, the system is modeled by the cooling coefficient of performance (COP), which is the ratio between the cooling load and the electric power at nominal steady-state conditions. The COP is taken to be constant and, in our case, is equal to the nominal value of the cooling COP of the system mentioned above (COP = 2.6).

The COP is also an initial comparison quality criteria for heat pump systems. It enables the estimation of the electrical consumption of the system during the simulation sequence.

This type of model is generally used by engineers to calculate the size of the air-conditioning appliances and to estimate the financial costs of HVAC systems.

### Model No. 1

This model aims to cover the control and start-up parameters of the system. For this purpose, the time step was reduced to one minute in order to take into account the on-off cycling and the control of the system.

**Steady-State Conditions.** The capacity rate is the nominal capacity of the system operating in steady state and standard conditions (27°C dry-bulb temperature, 19°C wet-bulb temperature, 35°C outdoor temperature). The system is characterized in the steady-state conditions by the *SHF* (sensible heat factor), which is the ratio between the sensible cooling rate and the total cooling rate. The *SHF* enables the determination of the sensible and latent capacities that will be implemented at each time step in the solving equations of the building model.

In our case (see Table 1),  $\dot{Q}_{tot} = 3.3$  kW and  $SHF = 0.76$ .

**Dynamic Conditions.** As seen in the modeling review above, the system capacity is modeled as a first order system to account for the start-up of the split system (O'Neal and Katipamula 1991, 1993).

Figure 1 shows the ideal capacity during start-up and shutdown of a residential air conditioner.

The instantaneous cooling capacity  $\dot{Q}_{cyc}$  is given by

$$\dot{Q}_{cyc} = \dot{Q}_{ss}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

where

- $\dot{Q}_{ss}$  = steady-state capacity in nominal conditions,
- $\tau$  = time constant for the system (experimental data), and
- $t$  = time after start-up.

The time constant for the system was determined experimentally in our test cell (see experimental setup section

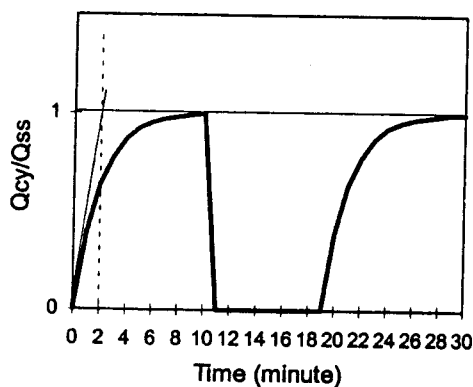


Figure 1 Dynamic behavior during start-up conditions.

below). The measurement of the start-up period of the split system enabled the determination of a time constant of 2 min.

**System Control.** The on/off controller with dead zone is the most commonly used control system in small size residential units. The experiment showed a controller dead zone of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  from the set temperature.

**Electric Power.** The electric power of the system is taken to be constant, even under start-up conditions (Goldsmith et al. 1980; O'Neal and Katipamula 1991, 1993).

In our case, the value in nominal conditions was  $P_e = 1.25$  kW.

### Model No. 2

The performances of an air-to-air heat-pump (total cooling capacity, sensible and latent capacities, electric power) are strongly influenced by parameters such as the indoor dry-bulb air temperature, the indoor relative humidity, and the outdoor air temperature. In model no. 1, the performances of the system are taken to be constant, but Figure 2 shows that they are dependent on these external inputs. The aim of this model is to take into account these parameters in steady-state conditions.

**Steady-State Conditions.** The method is based upon manufacturers' data shown in Table 1. These data have been measured under steady-state conditions, where the indoor dry-bulb temperature was kept constant. In addition to these data, the indoor air specific enthalpy was considered.

Table 1 enables the plotting of the total and sensible cooling capacities function of the indoor air specific enthalpy (see Figure 2).

As these experimental total and sensible capacity curves are nearly linear, it can be assumed that under a fixed outdoor temperature the sensible and total capacities follow linear

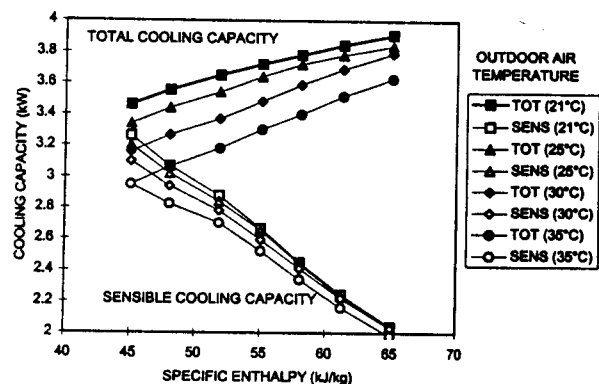


Figure 2 Evolution of total cooling capacity and sensible cooling capacity function of the indoor air specific enthalpy for different outdoor temperatures. Indoor air temperature = 27°C (data from Table 1).



laws. These equations, determined from manufacturers' data, are as follows:

$$\dot{Q}_{tot}(27^\circ\text{C}) = a_0 + a_1 \cdot h_{ent} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{sens}(27^\circ\text{C}) = b_0 + b_1 \cdot h_{ent} \quad (8)$$

where  $h_{ent}$  is the entering air specific enthalpy at the evaporator and  $a_0, a_1, b_0, b_1$  are the correlation coefficients of  $\dot{Q}_{tot}$  and  $\dot{Q}_{sens}$ , respectively, and depend on the outdoor air temperature. We determined the values of these coefficients for the different outdoor temperatures of 21°C, 25°C, 30°C, and 35°C. The values of 40°C and 45°C were not taken into account because on the one hand, this is outside the operating range of the split system, and on the other, the evolution of the capacities tends to become nonlinear.

When plotting the  $a_0, a_1, b_0, b_1$  coefficients as a function of exterior temperature, it is seen that they also follow linear laws. Thus, they are given by

$$a_0 = c_1 + c_2 \cdot T_{ae} \quad (9)$$

$$a_1 = c_3 + c_4 \cdot T_{ae} \quad (10)$$

$$b_0 = c_5 + c_6 \cdot T_{ae} \quad (11)$$

$$b_1 = c_7 + c_8 \cdot T_{ae} \quad (12)$$

where  $T_{ae}$  is the outdoor air temperature and  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7,$  and  $c_8$  are the calculated correlation coefficients from the linear Equations 9, 10, 11, and 12.

Through these correlations, the total capacity and the sensible capacity are given by the following equations for an indoor air temperature of 27°C.

$$\dot{Q}_{tot}(27^\circ\text{C}) = c_1 + c_2 \cdot T_{ae} + (c_3 + c_4 \cdot T_{ae}) \cdot h_{ent} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{sens}(27^\circ\text{C}) = c_5 + c_6 \cdot T_{ae} + (c_7 + c_8 \cdot T_{ae}) \cdot h_{ent} \quad (14)$$

The manufacturers' data enables the estimation of the total and sensible cooling capacities to be a function of the inside specific enthalpy and the outdoor air temperature for an inside set temperature of 27°C. To determine the cooling capacities at any operating point, the coil bypass factor concept (Hirsch 1982) can be introduced.

The coil bypass factor ( $BF$ ) model characterizes the air exiting the coil as a mixture of two major streams: the air that is uninfluenced by the coil and the air that leaves at coil surface temperature (apparatus dew point). The coil bypass factor is the fraction of air that is unaffected by the coil, given by

$$BF = \frac{T_{out} - T_{adp}}{T_{ent} - T_{adp}} = \frac{h_{out} - h_{adp}}{h_{ent} - h_{adp}} = \frac{w_{out} - w_{adp}}{w_{ent} - w_{adp}} \quad (15)$$

where

$T_{adp}$  = apparatus dew point temperature (temperature of the coil surface) and

$h_{adp}$  = specific enthalpy at the coil surface.

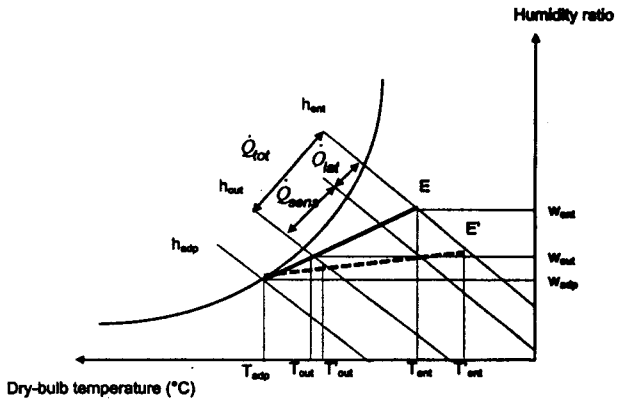


Figure 3 Cooling coil performance and determination of cooling capacities.

The coil bypass factor is a function of both physical and operational parameters of the coil; the coil exchange surface  $A$  (when  $A$  is increasing,  $BF$  is decreasing) and the coil air velocity  $v$  (when  $v$  is increasing,  $BF$  is increasing). In our model, it is assumed that these parameters are constant (air fan at top speed), so the bypass factor is also considered to be constant.

Figure 3 shows an illustration of the problem. One important assumption was made when developing this model: the total cooling capacity rate is considered to be constant for two operating points,  $E$  and  $E'$ , which have the same entering specific enthalpy that gives

$$\dot{Q}_{tot}(E) = \dot{Q}_{tot}(E') = \dot{m}(h_{out} - h_{ent}) \quad (16)$$

where  $\dot{m}$  is the mass flow rate of the air through the coil ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

The apparatus dew point is, in consequence, the same for the two entering points:

$$h_{adp}(E) = h_{adp}(E')$$

The sensible and latent capacities change between the two points, but the total capacity remains constant. Considering the point  $E'$ , Equations 13 and 14 give the value for the same specific enthalpy of the total capacity and the sensible capacity for a dry-bulb temperature of 27°C.

Thus,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sens} &= \dot{m}(h_{out} - h_p) = \dot{m} \cdot c_{pm}(T_{out} - T_E) = \dot{m} \cdot c_{pm}(1 - BF)(T_{adp} - T_E) \\ \dot{Q}_{sens}' &= \dot{m}(h'_{out} - h_{E'}) = \dot{m} \cdot c_{pm}(T'_{out} - T_{E'}) = \dot{m} \cdot c_{pm}(1 - BF)(T_{adp} - T_{E'}) \\ \dot{Q}_{sens}' &= \dot{m} \cdot c_{pm}(1 - BF)(T_{adp} - T_E) + \dot{m} \cdot c_{pm}(1 - BF)(T_E - T_{E'}) \end{aligned}$$

then

$$\dot{Q}_{sens}' = \dot{Q}_{sens} + \frac{\dot{V}}{v} c_{pm}(1 - BF)(27 - T_{E'}) \quad (17)$$

where  $\dot{Q}_{sens}'$  is the sensible capacity of the heat pump for the  $E'$  entering point and  $\dot{Q}_{sens}$  is the sensible capacity of the

heat pump for the  $E$  entering point ( $T_E = 27^\circ\text{C}$ ) given by Equation 14.

The latent loads can be determined with Equations 16 and 17.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{tot}(E) &= \dot{Q}_{tot}(E') \\ \dot{Q}_{sens}' &= \dot{Q}_{sens} + \frac{\dot{V}}{v} c_{pm} (1 - BF)(27 - T_{E'}) \\ \dot{Q}_{lat}' &= \dot{Q}_{tot} - \dot{Q}_{sens}'\end{aligned}\quad (18)$$

Then the values of  $\dot{Q}_{sens}'$  and  $\dot{Q}_{lat}'$  are integrated for each time step in Equations 3 and 5.

Finally, this method allows us to extrapolate at any operating point of the system the mathematical model computed from one temperature.

**Dynamic State Conditions.** The dynamic effects upon start-up are the same as in model no. 1 (single time constant).

**System Control.** The system control is an on/off controller with a dead zone of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  from the set temperature.

**Electric Power.** Table 1 indicates that the electric power is essentially dependent on the outside temperature, and the inside conditions have very little influence. The electric power as a function of the exterior temperature, as shown in Figure 4, appears to be linear.

It can, therefore, be assumed that the electric power is a linear function of the outdoor temperature. It is also assumed that there is no dynamic effect during the few time steps after start-up.

## EXPERIMENTAL SETUP AND TEST PROCEDURE

A single-speed air-to-air heat pump was set up and tested in a cell located at the University of Réunion Island. The

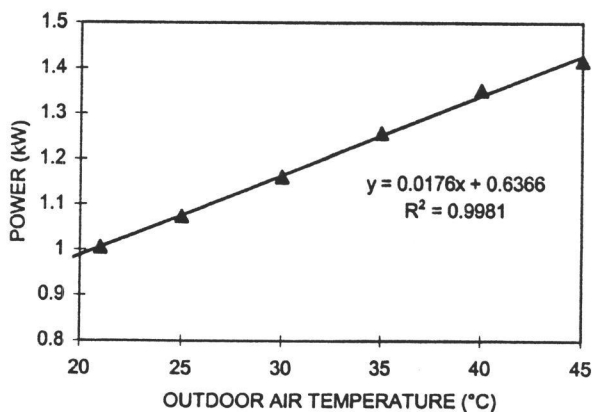


Figure 4 Electric power of the split system.

experiments were monitored under natural climatic conditions.

## Test Split System

The characteristics of the unit are shown in Table 1. Therefore, the manufacturers' data from which the models were established (time constant, dead zone) are the same for the experimental system.

Monitoring included the temperature of the refrigerant fluid from both sides of each component (indoor and outdoor units, compressor and expansion device) by means of thermocouples, the R-22 volume flow rate by means of a liter-meter, high and low pressures, and power and energy supply (active, apparent, and reactive) by means of an electronic watt-meter. Also, the inlet and outlet temperatures and the mass flow rate of the water from the indoor unit were measured.

Thus, we can determine the total cooling capacity through the thermodynamic cycle of R-22, both sensible and latent capacities, with the measures of the inlet and outlet temperatures of the indoor unit and the measured mass flow rate of the water.

## Test Cell

The size of the test-cell is  $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 2.30\text{ m}$  (see Figure 5). The test cell is made of sandwich panels composed of two 7 mm layers of cement-fiber boards with 6 cm of polyurethane foam between them. There is a 5 cm layer of styrofoam between the floor panel and the concrete. On the roof, there is an extra sandwich panel, made of aluminium sheets and polyurethane, that is approximately 5 cm thick. The inner floor is made of 5 cm concrete paving stones.

Indoor air temperatures are measured by type T (copper-constantan) thermocouples shielded against radiation, at three different levels (0.30 m, 1.20 m, and 1.80 m). External and internal temperatures are measured with type T thermocouples. The sensors are glued to the walls and painted the same

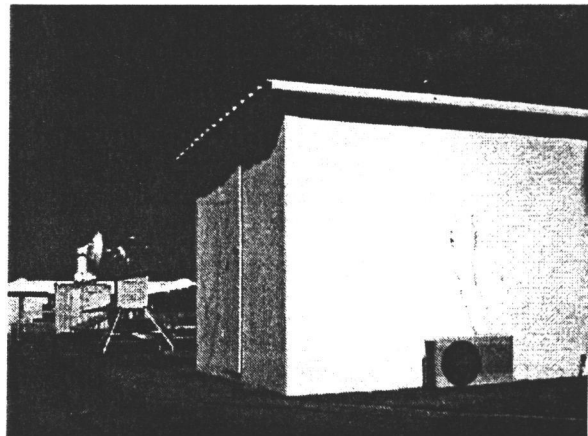


Figure 5 Test cell and outdoor unit of the split system.

color. The indoor relative humidity is also recorded by a temperature and relative humidity probe.

### Weather data acquisition

A weather station situated near the test cell (see Figure 5) was used to measure the outdoor air temperature, outdoor relative humidity, wind speed and direction, and global and diffuse horizontal solar radiations. These data, which constituted a meteorological file, were used to compare measurements and model predictions.

### Data Acquisition System and Computer Processing

All the data are measured and collected by dataloggers that are controlled and programmed by a PC computer via RS232 links. The time step of the data acquisition can be modified. For instance, a time step of one hour was used for the validation of the test cell without an HVAC system, but the time step was reduced to one minute when experimenting with the split system.

### Experimental Procedure

The experiments were managed at different stages.

1. A comparison between the simulation and the measurements on the test cell without an air-conditioning system was carried out in order to optimize the model of the cell. Figure 6 shows a passive period of two weeks. The measured and simulated air temperatures are similar with deviations smaller than 1°C.
2. Experiments were carried out in order to obtain accurate information about the behavior of the split system unit (determination of the time constant for models 1 and 2, values of the dead zone band of the controller, etc.) (Lucas

et al. 1997). Through these preliminary tests, a time constant of two minutes and a dead zone band within a range of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  from the set temperature was determined.

3. Experiments were carried out with the split system in the operating mode for different indoor dry-bulb set temperatures. The time step of the experiments was taken to be one minute. The test periods generally lasted for seven days. The first results are detailed below.

### RESULTS AND DISCUSSION

The internal setpoint was  $23^\circ\text{C}$  for the entire period of the measurements. No air change has been considered. There were no internal loads inside the test cell.

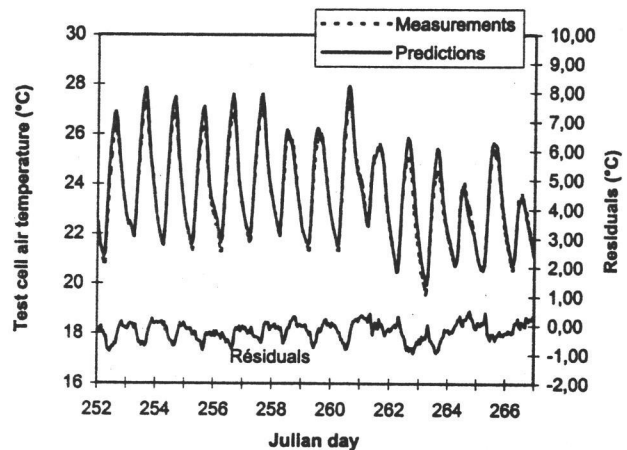


Figure 6 Comparison between measurements and predictions—passive period.

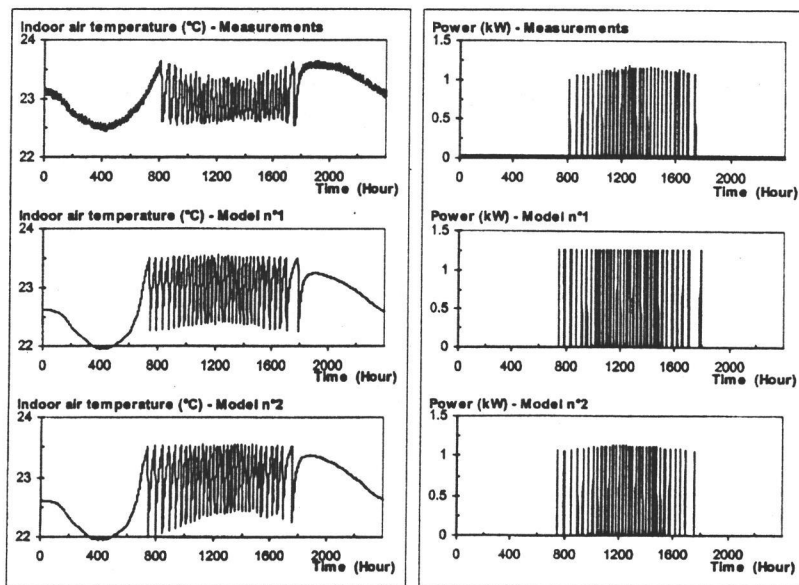


Figure 7 Evolution of indoor air temperature (left) and electric power (right) for short time steps (one minute).

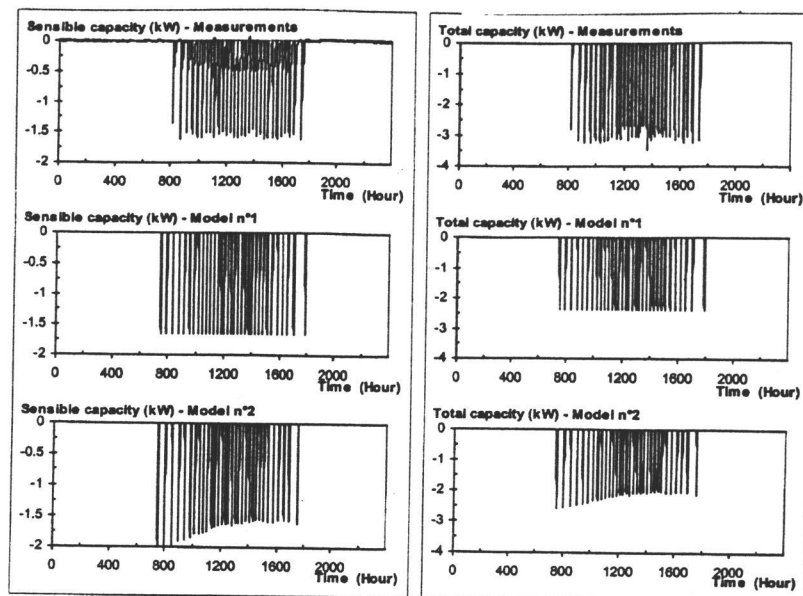


Figure 8 Evolution of sensible capacity (left) and total cooling capacity (right) for short time steps.

The main problem arising from these simulations is that the nonuniform air mixing is not accounted for. Our building model, as most of the building simulation codes, assumes that the air volume in the cell is homogeneous. Therefore, all the convective cooling capacity is transmitted directly to the air node in the model. The experiment shows that there is a delay between the transmission of the cooling capacity and the decrease in the room temperature. To make up for this occurrence, the air volume of the cell was increased in the model. The best results were obtained for a model volume five times bigger than the actual volume of the cell. The results presented below account for this correction.

Figures 7 and 8 present measured data and simulation results of models 1 and 2 for a time step of one minute. The presented outputs in these figures are the indoor air tempera-

ture, the electric power, the sensible cooling capacity, and the total cooling capacity. The selected day has been chosen from a test period of seven days (October 20-27, 1996) and has the greatest solar radiation.

Model no. 0 requires a time step of one hour. In order to compare this hourly model to the simulations of models 1 and 2 and to the measurements, results for a time step of one minute were averaged over one hour. Thus, Figures 9, 10, and 11 present the measured and simulated results of the different models for a time step of one hour. To compare the hourly model to the others, the results for short time steps have been integrated into one hour. The presented outputs are the average indoor air temperature, the total cooling capacity, and the electric power.

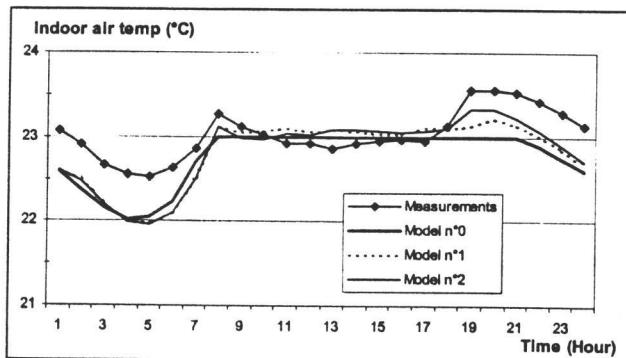


Figure 9 Indoor air temperature - comparison of measurements and simulations - time step = one hour.

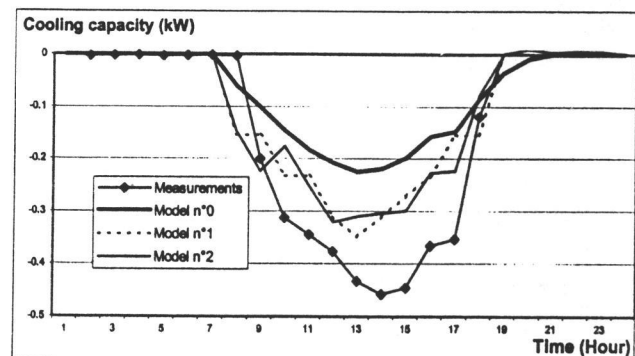


Figure 10 Total cooling capacity - comparison of measurements and simulations - time step = one hour.

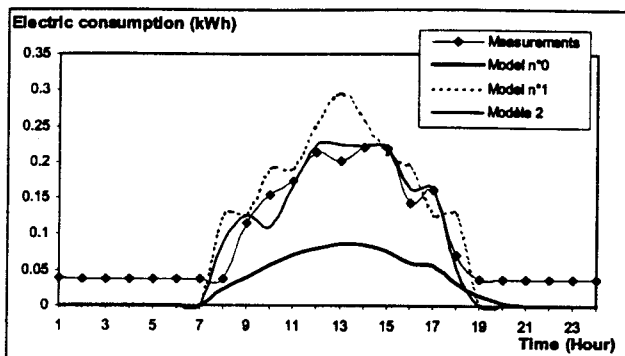


Figure 11 Electric power – comparison of measurements and simulations – time step = one hour.

Visual inspection and comparison of the various graphs give the following observations.

**Short Time Step (One Minute).** The comparison of the measured and simulated indoor air temperatures shows great similarity. The time of the first start-up of the split system is earlier in the models (approximately around 7:30 a.m.) than in the experiment (around 8:00 a.m.). This is due to a 0.5°C gap between the model and the measured temperatures during the passive period. Yet, the number of on/off cycles, the daily variations of the indoor air temperature, and the last shutdown (around 17:30) give acceptable results.

The same trends can be seen when considering the predicted power demand. Model no. 2 appears to be more accurate than model no. 1.

The predictions for the sensible cooling capacity (see Figure 8) show correct general trends when compared to the measured values. On the contrary, there is a large difference between the measured values and the two models for the total cooling capacity (see Figure 9). This difference is due to the fact that the time delay of one on/off cycle is shorter than the measured one. The modeled capacity does not have enough time to reach the steady-state value. Also, due to the nonhomogeneity of the air and the low fractional on-time, it is very difficult to have good results for the total cooling capacity. A higher fractional on-time would enable the system to reach a steady-state regime and, thus, probably give a more accurate model of the cooling capacity provided by the system.

The fractional on-time was calculated for each model by determining the on-time period and the total time for 10 cycles (see Table 2).

Table 2 shows that the number of cycles in one day is correctly simulated for the two models. The fractional on-time is very low. The system never reaches the steady-state regime.

**One-Hour Time Step.** Indoor air temperature predictions exhibit the same trends as the air temperature. This is quite obvious as these values are the average of the one-minute time step values. The maximum gap is around 0.5°C.

The predictions of total cooling capacities for models 1 and 2 are larger than the ones obtained for model no. 0 but remain below the experimental results. These discrepancies can be attributed to the simulation of the controller, which is taken into consideration in models 1 and 2 (and supposed to be ideal in model no. 0).

The cooling capacity remains underestimated (see Figure 10) but, as seen above, the system never reaches the steady-state condition and the modeling of a dynamic state is difficult due to the air volume mixing conditions, which are not taken into consideration in the model.

The same trends are shown in Figure 11 for the predictions of electric power demand. Model no. 2 appears to be the more accurate with an accuracy of 5%. On the contrary, model no. 0 considerably underestimates the power demand (–60%). We can also see the limits of hourly simulations when predicting system consumptions, such as heat pump systems with specific control strategies, and low fractional on-times.

The average cooling COP (over a day) is also low in relation to the COP under nominal regime (2.6). The influence of fractional on-time on the effective COP of the system is, therefore, of prime importance. Model no. 2 is very accurate regarding energy consumption and the average COP value compared to the experimental COP.

## CONCLUSION

Three modeling levels of air-to-air residential heat pumps have been defined and integrated in a thermal building simulation software. The first model is to supply the demand of hourly cooling loads and electric demand with an ideal control loop (no delay between the cooling supply and the time response of the system). The second model takes into account the on/off cycle and the control processing. The third model is based on a mathematical model determined from manufacturers' data. Dynamic effects are taken into consideration in the

TABLE 2  
Results of the Models for Short Time Steps

|              | Number of Cycles | On-Time (min) | Total time (min) | Fractional On-Time | Daily Number of Cycles |
|--------------|------------------|---------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Measurements | 10               | 26            | 163              | 16%                | 30                     |
| Model no. 1  | 10               | 30            | 149              | 20%                | 33                     |
| Model no. 2  | 10               | 30            | 149              | 20%                | 32                     |

**TABLE 3**  
**Results for an Hour Time Step**

|              | Daily Energy Consumption (kWh) | Difference vs. Measurements | Mean COP |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------|----------|
| Measurements | 1.68                           |                             | 1.6      |
| Model no. 0  | 0.68                           | -60%                        | 2.6      |
| Model no. 1  | 2.09                           | +25%                        | 1.22     |
| Model no. 2  | 1.76                           | +5%                         | 1.48     |

last two models through a single time constant model. The time step is reduced to one minute. The outputs are the total, sensible, and latent cooling capacities at each time step. All the equations of the HVAC models are coupled with the existing code and, therefore, do not increase the calculation time. The method shown for model no. 2 can be used for any system with manufacturers' data as shown in Table 1.

The first comparisons between the measurements and simulations show that a dynamic simulation with shorter time step than one hour give better results for the estimation of the electric consumption.

The system used for the experimental measurements is in fact oversized regarding the size of the cell. Therefore, the system never reaches the steady-state regime and has a low fractional on-time (16%). Thus, the reduced time step models give the best results as the start-up regime is the overriding factor in relation to the steady-state regime. Model no. 2 gives the best results regarding the energy consumption and the average COP in a day. On the contrary, the hourly model underestimates the daily energy consumption by 60%.

Nevertheless, improvements have to be made concerning the estimation of the total cooling capacity. We have to face the physical problems, such as nonhomogeneity of the air inside the test cell and air infiltration, which lead to a time gap between measurements and models. Future research will focus on the introduction of a time delay due to these physical phenomena.

Comparisons between the different models and experiments over higher fraction on-time systems will be carried out. These simulations should reach better results for model no. 0 when the system reaches its permanent state and enables the estimation of the real COP as a function of the fractional on-time and of the outside air temperature.

The interest of the multimodel aspect in our calculation code is that the short time step models could be used in a first simulation to estimate the COP as a function of the fraction on-time. In a second phase, a correction factor could be applied to the hourly model in order to determine the cooling capacity needs and the electricity consumption of a building during a long period. This will allow for a better accuracy of the hourly model without increasing the calculation time.

#### NOMENCLATURE

$A$  = area

$BF$  = bypass factor  
 $C$  = thermal capacity  
 $c$  = specific heat  
 $COP$  = coefficient of performance  
 $c_{pm}$  = specific heat of mixing of dry air and vapor  
 $\phi$  = radiation flux density  
 $h$  = specific enthalpy heat transfer coefficient  
 $K$  = thermal conductivity  
 $l_v$  = latent heat  
 $\dot{m}$  = mass flow rate  
 $re$  = outside radiation  
 $P_e$  = electric power  
 $Q$  = cooling capacity  
 $SHF$  = sensible heat factor  
 $T$  = temperature  
 $t$  = time  
 $\tau$  = time constant  
 $\dot{V}$  = air flow rate  
 $v$  = specific volume  
 $w$  = specific humidity

#### Subscripts

$adp$  = apparatus dew point  
 $ae$  = air outside  
 $ai$  = air inside  
 $ce$  = outside convection  
 $ci$  = inside convection  
 $cyc$  = cycle  
 $ent$  = entering  
 $in$  = inside or inlet  
 $lat$  = latent  
 $ri$  = inside radiation  
 $rm$  = inside radiant mean  
 $out$  = outside or outlet  
 $se$  = surface outside  
 $sens$  = sensible  
 $si$  = surface inside  
 $ss$  = steady state  
 $swe$  = short wave outside  
 $swi$  = short wave inside  
 $tot$  = total

#### REFERENCES

Allen, J.J., and J.F. Hamilton. 1983. Steady-state reciprocating water chillers models. *ASHRAE Transactions* 84 (2): 398-407.

- Armand, J.L., M. Mondot, N. Molle, P. Habershill, and M. Lallemand. 1990. Component based modeling of refrigerating compression cycle. In *Proceedings of System Simulation in Buildings*.
- Boyer, H., J.P. Chabriet, B. Grondin-Perez, C. Tourrand, and J. Brau. 1996. Thermal building simulation and computer generation of nodal models. *Building and Environment* 31 (3): 207-214.
- Boyer, H., F. Garde, J.C. Gatina, and J. Brau. 1998. A multiple approach to building thermal simulation for design and research purpose. *Energy and Buildings* 28 (1): 71-78.
- Bullock, C.E., D.E. Wroblewski, and G.C. Groff. 1983. A dynamic simulation model for residential air-to-water heat pump system. In *Proceedings of the XVIIth International Congress of Refrigeration, Paris*, vol. 5.
- Chi, J., and D. Didion. 1982. A simulation model of the transient performance of a heat pump. *International Journal of Refrigeration* 5 (3): 176-184.
- Clarke, J.A. 1985. *Energy simulation in building design*. Glasgow (U.K). Boston: Adam Hilger Ltd.
- Crawford, R.R. 1987. Dynamic modeling of a residential heat pump from actual system performance data. *ASHRAE Transactions* 93 (2): 1179-1190.
- Ellison, R.D., and F.A. Creswick. 1978. A computer simulation of steady-state performance of air-to-air heat pumps. ORNL/CON16.
- Garde, F., H. Boyer, and J.C. Gatina. 1999. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in French tropical island buildings. *Building and Environment* 34: 71-83.
- Garde, F. 1997. Validation et développement d'un modèle thermo-aérodynamique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes, Ph.D. thesis, University of Réunion Island, France.
- Gluck, R., and E. Pollack. 1978. Design optimisation of air-conditioning systems. *ASHRAE Transactions* 84 (2): 304-314.
- Goldsmith, V.W., G.H. Hart, and R.C. Reiner. 1980. A note on the degradation coefficient of a field tested heat pump cooling and heating mode. *ASHRAE Transactions* 86 (2).
- Hensen, J.L.M. 1993. Towards an integrated approach of building and HVAC system. *Energy and Buildings* 19: 297-302.
- Hirsch, J.J. 1982. Simulation of HVAC equipment in the DOE-2 program. In *Proceedings of System Simulation in Buildings*, Liège, pp. 89-107.
- Irving, S.J. 1986. APACHE—An integrated approach to thermal and HVAC systems analysis. *International Journal of Ambient Energy* 7 (3): 129-136.
- Katipamula, S., and D.L. O'Neal. 1991. Performance degradation during on-off cycling of single-speed heat pump operating in the cooling mode: Experimental results. *ASHRAE Transactions* 97 (2): 331-339.
- Lucas, F., F. Garde, H. Boyer, and J.C. Gatina. 1997. Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de système de traitement d'air. In *Proceedings of the 3ème Colloque Inter-Universitaire Franco-Québécois, Toulouse*.
- Loveday, D.L., and R.A. Ewers. 1990. The cost effectiveness of heat pumps operated by a BEMS—A comparison of smart and standard control using dynamic simulation. In *Proceedings of System Simulation in Buildings*.
- MacArthur, J.M., and E.W. Grald. 1987. Prediction of cyclic heat pump performance with a fully distributed model and a comparison with experimental data. *ASHRAE Transactions* 93 (2): 1159-1178.
- Mulroy, W.J., and D.A. Didion. 1985. Refrigerant migration in a split-unit air conditioner. *ASHRAE Transactions* 91 (1A): 193-206.
- Mulroy, W.J. 1986. The effect of short cycling and fan delay on the efficiency of a modified residential heat pump. *ASHRAE Transactions* 92 (1): 813-826.
- Murphy, W.E., and V.W. Goldsmith. 1979. The degradation coefficient of a field tested self-contained 3-ton air conditioner. *ASHRAE Transactions* 85 (1): 839-849.
- O'Neal, D.L., and S. Katipamula. 1991. Performance degradation during on-off cycling of single-speed air conditioners and heat pumps: Model development and analysis. *ASHRAE Transactions* 97 (2): 316-323.
- O'Neal, D.L., and S. Katipamula. 1993. Development of nondimensional cycling model for estimating the seasonal performance of air conditioners. *Journal of Solar Energy Engineering* 115: 176-181.
- Rice, C.K., S.K. Fischer, R.D. Ellison, and W.L. Jackson. 1981. Design optimization of conventional heat pumps: Application to steady-state heating efficiency. *ASHRAE Transactions* 87 (1): 1037-1054.
- Sami, S.M., T.N. Duong, Y. Mercadier, and N. Galanis. 1987. Prediction of the transient response of heat pumps. *ASHRAE Transactions* 93 (2): 471-490.
- Stan, S. 1993. *Maîtrise et calcul des consommations des installations de climatisation*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Welsby, P., S. Devotta, and P.J. Diggory. 1988. Steady- and dynamic-state simulations of heat pumps. Part I: Literature review. *Applied Energy* 31: 189-203.
- Xin Ding, J.P. Eppe, J. Lebrun, and M. Wasacz Marian. 1990. Previous models and new proposals of cooling coil in transient and/or wet regimes. Theoretical and experimental validation. In *Proceedings of System Simulation in Buildings*.

## Study of moisture in buildings for hot humid climates

Franck Lucas<sup>\*,1</sup>, Laetitia Adelard<sup>1</sup>, François Garde<sup>1</sup>, Harry Boyer<sup>1</sup>

*Laboratoire de Génie Industriel, IUT de Saint Pierre, Université of Reunion Island, 40 avenue de Soweto,  
Saint-Pierre, Reunion Island, 97 410, France*

Received 5 June 2001; accepted 15 August 2001

### Abstract

Humidity in buildings generates many disorders or disadvantages. A dry-bulb temperature of the air relatively low, strong moisture and wall surface temperatures very low characterize the interior conditions of the highland dwellings in Reunion Island, during the southern winter. This causes many disorders related to phenomena of condensation on walls: deterioration of the envelope, odor of mould. It is thus, significant to precisely know the evolution of the moisture in a building to avoid any disorder on the frame. In this study we will expose a series of experiments carried out on real residences in order to highlight main parameters of the problem. On the basis of these results, numerical simulations were used to extrapolate the behavior of this building on unusual climatic sequences, holding account various improvements of its constitution. A curative study and a preventive study were carried out on two different types of residences. The aim is to propose solutions to prevent deteriorations of the coatings due to the surface condensation. © 2001 Published by Elsevier Science B.V.

**Keywords:** Humidity; Condensation; Expérimentations; Numerical simulations; Humid climate

### 1. Introduction

In moderate climate, hydrous transfers in buildings are relatively well controlled as they are generally in a well-defined direction. Indeed, interior climatic conditions are controlled by air-conditioning systems, which ensure a constant temperature. In certain cases, humidity is also controlled precisely. In wet tropical climate a majority of residences is not air-conditioned and the interior temperature and humidity are free floating. Moreover, in the highlands of Reunion Island, the dry-bulb temperature of the air decreases appreciably with altitude to go down below the usual values of comfort. Low dry-bulb temperature of air, strong moisture and wall surface temperatures very low characterize the interior conditions of the highland dwellings, during the southern winter. Taking into account the external conditions the transferred moisture quantities are significant. It follows of many disorders related to phenomena of condensation on wall. The buildings' owners confronted with these problems have significant maintenance and restoration costs, and must work out preventive and

curative solutions. They then initiated this study and the carried out reflection takes into account the economic constraints they are confronted with. This paper proposes to present the methodology used and the results obtained. After a reviewing concerning moisture in buildings, we will present the study undertaken in order to cure the problems on existing dwellings. This first study is composed of a series of measurements carried out to examine buildings having undergone degradations with an aim of identifying the causes of the damages. We will then present the tools used for simulations and the results, which validate some improvements concerning the thermal design of the envelope and the associated systems, in order to cure the problems. In the third part, we will present the study carried out for a building project with a timber structure and therefore with preventive purposes.

### 2. Outline relating to humidity in buildings

Humidity in dwellings has consequences not only on the comfort and health of occupants but also on perennality of the coatings and the frame. Condensation of water contained in air occurs when the relative humidity reached a limiting value known as saturation. Condensation can appear in the form of droplets in suspension in air (fog) or on a cold material support. The presence of fog in a

\* Corresponding author. Tel.: +33-2-62-96-28-94;  
fax: +33-2-62-96-28-99.

E-mail address: lucas@univ-reunion.fr (F. Lucas).

<sup>1</sup> Tel.: +33-2-62-96-28-91; fax: +33-2-62-96-28-99.



### Nomenclature

|           |   |
|-----------|---|
| $\varphi$ | mass flow rate (kg/m <sup>2</sup> s)      |
| $\dot{m}$ | mass flow (kg/s)                          |
| $\pi$     | permeability (kg/m Pa s)                  |
| $H$       | relative humidity (%)                     |
| $P$       | pressure (Pa)                             |
| $x$       | distance (m)                              |
| $T$       | temperature (k)                           |
| $w$       | humidity ratio (kg/kg <sub>dryair</sub> ) |
| $h$       | exchange coefficient (W/Km <sup>2</sup> ) |

### Subscript

|      |                        |
|------|------------------------|
| v    | vapour                 |
| air  | air in the zone        |
| ae   | outside air            |
| as   | dry air                |
| surf | surface                |
| sat  | saturation             |
| c    | convection             |
| i    | subscript of the zones |

dwelling is rare. It is generally confined in specific parts and over short periods related to the occupant activity. Natural or mechanical ventilations are intended to fight efficiently against these internal contributions. Condensation on a material support occurs when the temperature of this one is lower than the air dew point temperature of the zone. This case worries the designers by the degradations involved on the support. The caused disorders are generally deteriorations of the interior coatings (yellowish, black spots and then separation of paintings). Phenomena of corrosion of the metal structure can appear in the event of cracks in the coating. The hydrous transfers depend on the following phenomena:

- Diffusion of water vapor through the envelope of the room;
- Surface condensation of the water vapor;
- Absorption and water vapor desorption by hygroscopic materials of the room;
- Airflow transfers with the outside or the other zones of the building;
- Diffusion of vapor in the air;
- Production of vapor dependent on occupants and their activities;
- Injection or withdrawal of moisture by HVAC system.

#### 2.1. The water vapor diffusion through a wall

This depends on the difference of partial pressure of vapor on both sides of the wall and the permeability of material following the law

$$\varphi_{v,air} = -\pi \frac{dP_v}{dx} \quad (1)$$

This equation imposes a good knowledge of the material properties constitutive of the wall and applies badly to heterogeneous or strongly hygroscopic materials. Several methods of wall design are based on this equation: Dew-point method, Glaser diagram. Their objective is to evaluate the possibility of condensation of the water vapor during its migration through the wall. These methods are intended for the study of the wall in steady state conditions. In moderate climates, as the building are more often heated, the migration of vapor is from outside to inside. In tropical climate, most of the time, outside and inside conditions vary without any control and consequently, the direction of the vapor flow is not so well defined as the experiment will show it. Moreover, the steady state methods do not consider the cycles of condensation/evaporation. It is then difficult to evaluate generated damages, knowing that a small quantity of condensation remains tolerable. In the simulation codes, the term of water vapor diffusion through the envelope is often neglected in the hydrous balance of a zone. Its influence is indeed weak comparison with the quantities exchanged through openings or by ventilation.

#### 2.2. Surface condensation

It happens when the temperature of a wall is lower than the dew point temperature, we have

$$\dot{m}_{v,cond} = S\varphi_{cond} \quad (2)$$

The rate of vapor condensation depends on the difference in partial pressure of vapor between the air of the room and the air on the surface of the wall and can be expressed by [1]

$$\varphi_{cond} = \varpi(P_{v,air} - P_{v,surf}) = \varpi(P_{v,air} - P_{v,sat,surf}),$$

$$\varpi = 7.4 \times 10^{-9} h_c \quad (3)$$

where, for walls

$$h_c = 1.079 \Delta T^{0.33} \text{ and for tilted roofs, } h_c = 1.135 \Delta T^{0.33} \quad (4)$$

with [2]

$$P_{v,air} = \frac{H}{100} P_{v,air,sat}$$

$$P_{v,air,sat} = 140974 \times 10^5 \exp\left(\frac{-3928.5}{T_{air} + 231.667}\right) \quad (5)$$

$$P_{v,sat,surf} = f(T_{surf}) = 140974 \times 10^5 \exp\left(\frac{-3928.5}{T_{surf} + 231.667}\right) \quad (6)$$

#### 2.3. The hygroscopic behavior of materials

The hygroscopic behavior of materials is not always taken into account in building thermal simulations. However, it constitutes in certain case a significant element of moisture exchanges in a room. One can distinguish two types of models,

• the detailed models, based on the diffusion law of the water vapor through the walls of the envelope and in materials of the room. These models require a perfect knowledge of the building constitution and the characteristics of the materials used. This data are often difficult to evaluate in the project phases as well as for the existing buildings.

• the simplified models simulate the behavior of a fictive volume representing materials of the room reacting with the moisture of the air. This fictive volume called buffer, generally consists of two parts: a surface element reacting with the moisture of the zone and a heat exchanging with the surface element. The buffer is characterized by a reduced number of coefficient. They are evaluated either summarily by qualifying more or less the behavior of the hygroscopic room [3] or, more precisely, by giving a description of the materials of the room and their properties [4]. Another type of models consists in defining two buffers one reacting quickly with the moisture of the air and the other slowly [5].

For the curative study, we studied uninhabited residences consisting of little hygroscopic materials (metal roof and wall in coated breeze blocks) so, we will not consider the phenomena of absorption or desorption due to hygroscopic materials. On the other hand, for the preventive study, the structure of buildings being made of timber we chose to carry out simulations using TYPE 56 of TRNSYS [4]. This multi-zone building model includes a hygroscopic buffer model.

#### 2.4. The airflow transfers

The air transfers with outside or with the other zones intervene in the moisture balance of the zone in the form

$$\dot{m}_{v,airflow} = \dot{m}_{as}(w_{ae} - w_i) \quad (7)$$

#### 2.5. The vapor diffusion in the air

It is generally neglected compared to the quantities exchanged by airflow transfers.

#### 2.6. Contributions due to the occupants

The releases of vapor due to occupants and their activity are significant and can reach up to 20 l of water per day for a family of four people. This load appears in the moisture balance of the zone in a term giving the vapor generation rate.

#### 2.7. Contributions due to air conditioning systems

The most common type of HVAC system used in Reunion are split-system functioning with 100% of recycled air. The moisture exchanges due to HVAC are evaluated according to the evolution of the air on the exchanger.

The heating of air is done with constant absolute humidity and does not modify the moisture balance of the zone. The split-systems used carry out a cooling, with generally a dehumidification of the air through the cold battery. The quantity of condensates extracted from the zone will then be determined by

$$\dot{m}_{v,STA} = \dot{m}_{as}\varepsilon(w_b - w_i) \text{ with } \varepsilon = \frac{w_i - w_e}{w_i - w_b} = \frac{T_i - T_e}{T_i - T_b} \quad (8)$$

### 3. Curative study

#### 3.1. Introduction

This work is intended to study the problem of condensation on existing buildings. A series of measurements was carried out to highlight the various sites of surface condensation, the process of condensation and the repercussions concerning the users of the dwellings. This phase will have to validate some assumptions required for mathematical modelling. Instrumentation was thus, carried out on empty dwellings. Moreover, users were interviewed in order to determine their behaviors and their reaction to the problems encountered. This study will lead to prescriptions and evaluation of improvements, which can be applied to existing residences.

#### 3.2. Series of measurements

##### 3.2.1. The buildings under study

The study relates to two groups of dwellings located in the highlands of Réunion Island at "L'Entre-Deux" (400 m of altitude) and "Le Tampon" (800 m) (see Fig. 1). The studied residences do not comprise heating or cooling system. The majority of the instrumented residences are uninhabited and not furnished. The studied rooms are isolated from other rooms of the dwelling by closing the gates of communication. The walls are in hollow blocks of 20 cm covered with painted coating mortar outside and inside. The roof consists of a ceiling in plasterboards of 1.2 cm, a air layer, glass wool insulator for the building in "l'Entre-Deux" (no insulation for the building in "Le Tampon") and a corrugated iron.

The experimental campaign was conducted during the end of the coldest period of the year corresponding to the southern winter. The two sites are characterized by different climatic conditions. "Le Tampon" is generally colder and wetter than the site of "l'Entre-Deux". The average temperature and relative humidity are given in Table 1.

The most damaged rooms of the buildings were instrumented in a precise way. The characteristics of the air of the rooms (dry-bulb temperature, resultant temperature, relative humidity) were noted down as well as the temperatures of surface of the walls, floor and ceiling. The main damages being located on the ceiling, we measured the characteristics of the air layer inside the ceiling and the surface tempera-

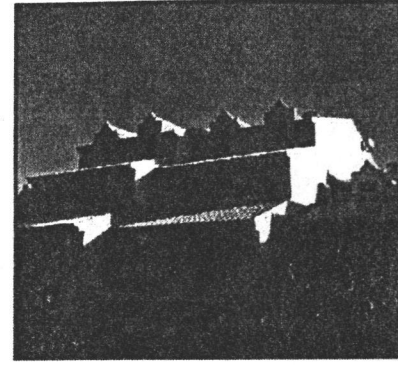


Fig. 1. Buildings under study: Le Tampon and l'Entre-Deux.

Table 1  
Climatic conditions of the two sites.

|              |             | Mean | Minimum | Maximum |
|--------------|-------------|------|---------|---------|
| Le Tampon    | Temperature | 19.9 | 12.1    | 25.4    |
|              | Humidity    | 70.4 | 33.5    | 92.0    |
| L'Entre-deux | Temperature | 19.2 | 12.3    | 27.5    |
|              | Humidity    | 68.4 | 33.9    | 93.6    |

240 tures of the various parts of the frame. The complete  
 241 instrumentation requiring the drilling of the ceiling and  
 242 the installation of a heavy hardware, the living rooms and  
 243 the bathrooms of the inhabited residences were instrumented  
 244 in a reduced way by small autonomous sensors of air  
 245 temperature and relative humidity.

3.2.2. Experimental results

In Fig. 2, the sites of condensation a negative difference between temperature and dew point temperature of air. Condensation occurs almost throughout the night but is more pronounced after 8:00 am. It appears on steel structure in the morning when it is cooled by conduction and when the temperature of the surrounding air is at its minimum. Under certain colder climatic conditions, condensation can appear on the higher face of plaster walls, and on the lower face of plaster insulation in the roof). Let us note that the rooms to the south and the west have more solar contributions.

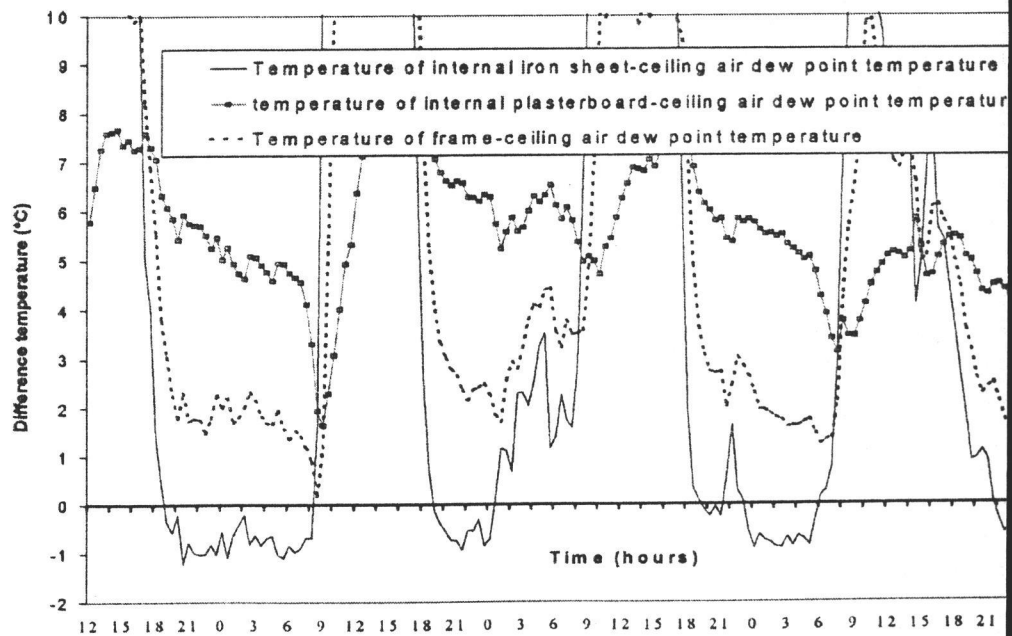


Fig. 2. Visualization of surface condensation in the roof.

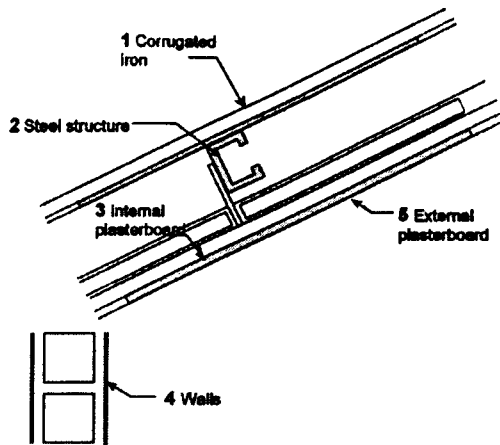


Fig. 3. Sites of condensation.

262 The principal sites of condensation are identified and pre-  
 263 sented in Fig. 3 by order of importance in the diagram below:  
 264 Fig. 4 shows the evolution of vapor pressure for the indoor  
 265 and the outdoor conditions. One can notice that the sign of

vapor pressure gradient, between inside and outside, 266  
 expressed in Eq. (1), is changing along the period. The 267  
 diffusion of vapor is from outside to inside during the day 268  
 and reverse at night. Anyway, the vapor pressure gradient is 269  
 weak and thus, a very few quantity of vapor is transferred by 270  
 diffusion. This can justify the assumption to neglect the 271  
 vapor diffusion through walls used in simulation codes. 272  
 Moreover, we can notice that the position of vapor barrier is 273  
 consequently not well defined in this climate. 274

The relations given above allow determining the condensed 275  
 vapor mass flux. Fig. 5 gives the evolution of the 276  
 vapor mass flux during 1 day. The average daily quantity of 277  
 condensed vapor by ( $m^2$ ) of roof surface is about 0.04 kg. 278

The streaming of condensates depends on the quantity of 279  
 water, on the slope and on the surface quality of the sheet. 280  
 Experiments give the maximum quantity of water being able 281  
 to condense on a sloping sheet before the streaming (see 282  
 Fig. 6). Let us notice that for some vertical parts of the roof 283  
 the streaming can appear for a quantity of water of  $60 g/m^2$ . 284  
 For a slope of  $30^\circ$ , (current slope of roofs) the streaming 285  
 intervenes for  $100 g/m^2$ . If one compares this value with the 286  
 average quantities of condensate observed during the experi- 287

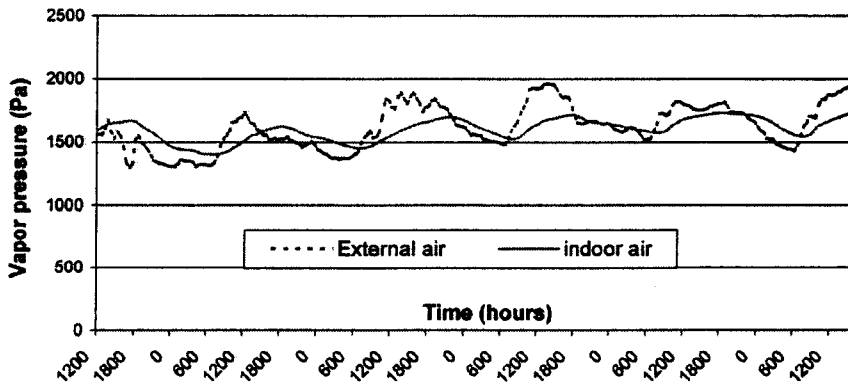


Fig. 4. Evolution of vapor pressure of indoor and outdoor humid air.

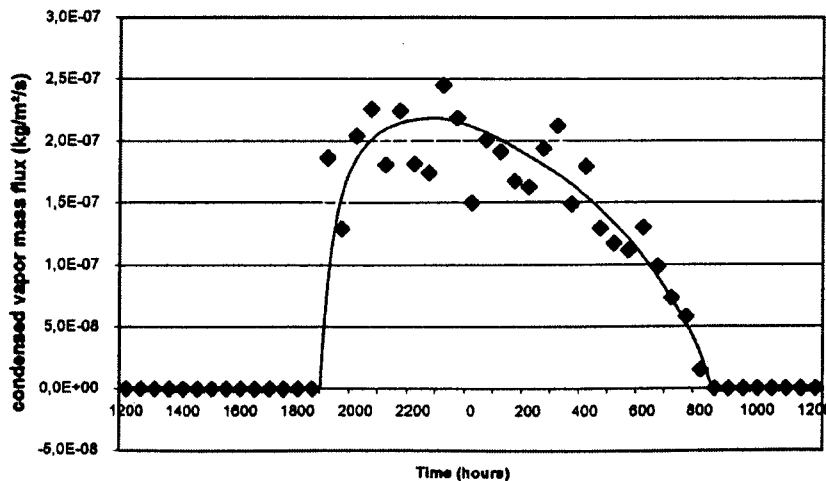


Fig. 5. Daily evolution of condensed vapor mass flux.

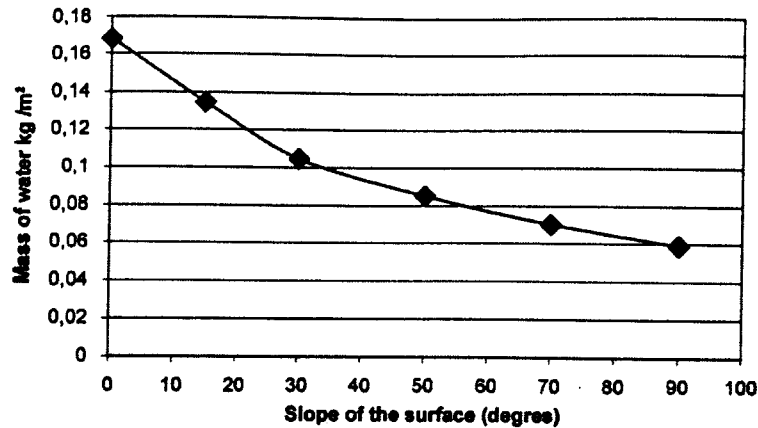


Fig. 6. Maximum quantity of condensed vapor before streaming.

288 ments, one can suppose that the streaming appears only at  
 289 the time of exceptional climatic conditions. Noted damages  
 290 on buildings can be explained partly by the occasional  
 291 streaming of condensation on the wall. Moreover, the accu-  
 292 mulation of water in an absorbent insulation decreases its  
 293 thermal qualities and creates a significant cold bridge. The  
 294 condensation is increased on the parts of the frame than  
 295 those of poorly insulated.

296 The ventilation of the air layer of the roof by a circulation  
 297 of external air is usually used along the coastal line to ensure  
 298 the cooling of the buildings. This technique was reproduced  
 299 in certain buildings located in altitude to drain off the  
 300 humidity from the roof. By comparing the dew point tem-  
 301 perature of the external air with the temperatures of the two  
 302 principal sites of condensation of the roof (internal surface  
 303 of iron sheet and steel structure), in the Fig. 7, one notes that  
 304 the phenomena of condensation persist. As the Fig. 8 shows,  
 305 ventilation of roof air layer with external air or inhabited  
 306 room air does not bring a solution to the problems of

condensation. One can suppose that this step makes the  
 problem worse by continuously feeding the lower surface of  
 the sheet with external air close to condensation. In the case  
 of non-ventilated ceilings, the humidity ratio and thus, the  
 dew point temperature of the air decreases as moisture  
 condenses and tends towards a limit value corresponding  
 to equilibrium. As equilibrium is reached condensation  
 ceases. If the roof is ventilated, the dew point temperature  
 of air is determined by the external conditions and thus,  
 condensation will persist as long as the surface temperature  
 of the sheet will be lower than the dew point temperature. In  
 this case, the quantity of condensates may be more signifi-  
 cant. In the highlands of Reunion, a ventilated air layer  
 should be used carefully and only in order to dry possible  
 infiltration of water trough the roof.

The presence of insulation in the ceiling modifies the  
 phenomena of condensation appreciably. Indeed, as the  
 sheet exchanges less energy with the other parts of the roof,  
 the sheet cools faster and reaches more quickly a tempera-

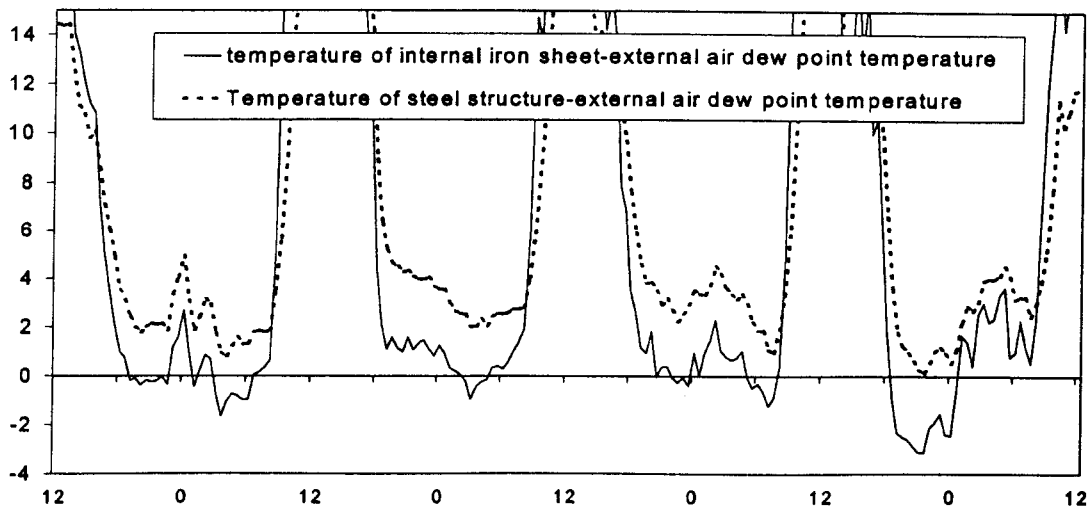


Fig. 7. Ventilation of air layer with external air.

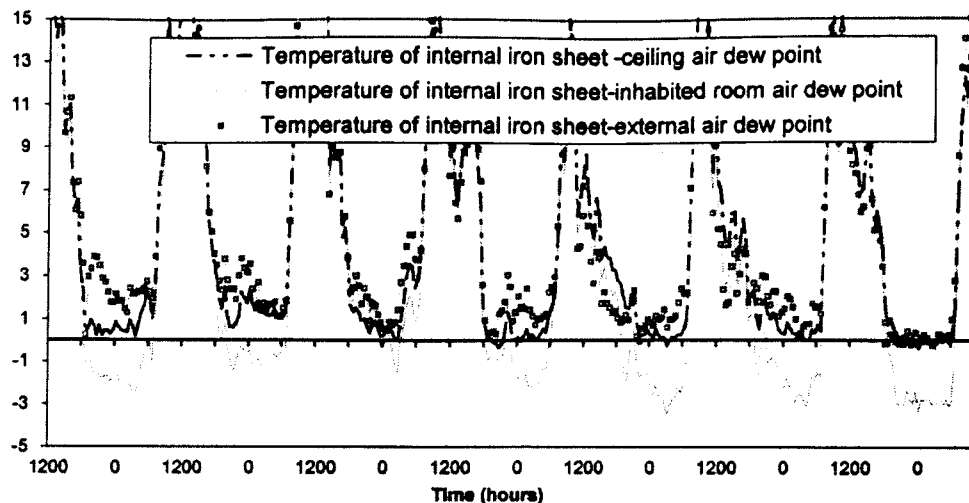


Fig. 8. Ventilation of air layer with various air.

326 ture lower than the dew point temperature. Moreover, the  
 327 roofs are generally about 30° tilted. This slope allows the  
 328 streaming of the condensed water and thus, prevents the  
 329 formation of a liquid film of which thermal resistance would  
 330 have opposed condensation. By combining the insulation of  
 331 the underface of the roof and the slope of the sheet, one  
 332 produces a condenser for atmospheric humidity similar to  
 333 those used in the hot and dry climates to recover water. The  
 334 presence of insulation in the roof has as a consequence, a  
 335 more significant condensate mass on the sheet and for a  
 336 longer period with risks of streaming and accumulation in  
 337 certain parts of the roof. Let us note however, that the  
 338 temperatures of the other parts of the roof, located under  
 339 insulation, raise and then remain always higher than the dew  
 340 point temperature. In particular, condensation does no  
 341 longer appear on the plasterboard lining of the ceiling.  
 342 The insulation remains, thus, an essential protection for  
 343 interior surfaces of housing.

### 344 3.3. Numerical simulation

345 The prescriptions of improvement were supported by a  
 346 phase of numerical simulations based on the use of thermal  
 347 building simulation software and on a weather data gen-  
 348 erator. These two tools will be briefly described below.

#### 349 3.3.1. The tools

350 CODYRUN [6,7], is a multi-zone and multi-model soft-  
 351 ware for the simulation of building thermal behavior. It is a  
 352 simulation code gathering both design and search aspects,  
 353 and adapted to various types of climates. In particular, for  
 354 our study, CODYRUN allows to choose models adapted to  
 355 wet tropical climate. This software integrates natural venti-  
 356 lation and moisture transfers. Hypothesis is made that  
 357 humidity is tracked by airflow transfers and generated by  
 358 internal loads in each zone. There is no interaction between

humid air and walls or furnishing. Based on the nodal  
 analysis, the resolution uses an implicit finished difference  
 method and the coupling iterations between the zones enable  
 to calculate the evolution of temperatures and the energy  
 exchanged. CODYRUN determine the characteristics of the  
 air of the zone as well as the wall surface temperatures. As  
 for the interpretation of the experimental results, a surface  
 temperature lower than the interior air dew point tempera-  
 ture will announce the appearance of condensation. The  
 absorption of materials and the variation of the water content  
 of the air due to condensation are not taken into account by  
 the software. Indeed, CODYRUN does not calculate the  
 quantities of condensate. We will thus, qualify the prescrip-  
 tions by evaluating the duration of the condensation period.  
 Taking into account these assumptions, one can expect that  
 those will be slightly over-estimated.

RUNeole [8] is a new climate generator usable in the wet  
 tropical zones. The software is composed of three principal  
 modules allowing description, creation of mathematical  
 and physical models starting from the existing weather  
 databases, and exploitation of these models for the genera-  
 tion of new data. A temporal or space interpolation of the  
 databases is then possible. These models are filed according  
 to the sites and to the periods covered. Generally, the use of  
 the weather databases supports two complementary steps  
 [9]. The first approach, used for the dimensioning of the  
 systems (mainly the HVAC systems) uses extreme and  
 current climatic sequences of short duration. This type of  
 sequences consists of standard days which one will have  
 associated a frequency of occurrence. Data generated arti-  
 ficially by the software worked out by Van Paassen [10] or  
 Degelman [11] can also be used. The second approach  
 integrates the use of years of reference and finds its applica-  
 tion in the evaluation of the average power consumption of a  
 building. The weather data generators also provide this type  
 of data while being based on functions of correlation,

Table 2  
Artificial climatic conditions for the two locations

| Location       | Type of days          |                  | Mean | Minimum | Maximum |
|----------------|-----------------------|------------------|------|---------|---------|
| "Le Tampon"    | Extreme day of winter | Temperature (°C) | 11.7 | 9       | 15      |
|                |                       | Humidity (%)     | 90   | 78.0    | 99.0    |
|                | Average day of winter | Temperature (°C) | 14.4 | 11      | 21.7    |
|                |                       | Humidity (%)     | 70.6 | 60.0    | 90.0    |
| "l'Entre-Deux" | Extreme day of winter | Temperature (°C) | 12.5 | 10.4    | 13.3    |
|                |                       | Humidity (%)     | 90   | 70.0    | 99.0    |
|                | Average day of winter | Temperature (°C) | 16.2 | 10.0    | 24.5    |
|                |                       | Humidity (%)     | 72   | 48.0    | 90.0    |

395 stochastic models and statistical distributions of the various  
396 climatic variables [12].

397 For our study, in order to test the technical improvements  
398 suggested to decrease the condensation and considering that  
399 simulated buildings were poorly hygroscopic, we need  
400 severe climatic data on short periods. The experimentation  
401 did not occur during the coldest month of the year, i.e. July in  
402 Reunion Island, we used the generator RUNeole for the  
403 generation of artificial data following the system dimension-  
404 ing approach explained above. The quantitative criteria for  
405 the definition of extreme and average climatic sequences are  
406 exposed to the following Table 2.

407 For the site of "l'Entre-Deux", the only available data  
408 was for September. Initially, we used the temperature data to  
409 adapt them to the monthly average of July (16°C). The total  
410 solar radiation was computed according to the thermal  
411 amplitude, and to the clearness index. The diffuse radiation  
412 was computed based on the clearness index and the function  
413 of correlation determined [13] for the highlands of Reunion.  
414 The relative humidity is determined according to the abso-  
415 lute moisture calculated starting from the initial value of  
416 temperature and moisture. The wind conditions were  
417 regarded as identical because corresponding to the winter  
418 conditions. For the site of "Le Tampon", we got the  
419 temperature and relative humidity data for the experimenta-  
420 tion period. Since the radiation data were not available, we  
421 interpolate the radiation data of the site "L'Entre-Deux"  
422 (altitude: 400 m) and of another site "La Plaine des Caffres"  
423 (2000 m). The temperature, moisture and radiation data  
424 were then interpolated temporarily by using the same algo-  
425 rithm exposed previously to have the average and extremes  
426 sequences during the coldest month.

### 427 3.3.2. The step used

428 The experimental phase initially enabled us to character-  
429 ize the behavior of the two buildings vis-à-vis the problems  
430 of condensation under real climatic conditions. We can now  
431 define the improvements to be brought to this building type.  
432 The goal of the simulations is to evaluate the risks of  
433 condensation under more extreme climatic conditions and  
434 to validate this suggested improvements. For each site, we  
435 worked out two short climatic sequences using the weather  
436 data generator RUNeole. One sequence is representative of a

average day of the coldest month (sequence AD: average 437  
day) and the other sequence represent an extreme cold day of 438  
this coldest month (sequence ED: extreme day). The build- 439  
ing improvement programmes tested are based on the use of 440  
mechanical ventilation in the room and on insulation of the 441  
roof. An additional program envisages the insulation of the 442  
exterior walls. Simulations were carried out following dif- 443  
ferent scenarios of occupation, renewal of air and internal 444  
loads during the day. Indeed, occupation of the residences 445  
induced sensible and latent additional loads and variable 446  
airflow during the day, according to the user behavior. The 447  
description of an existing building implies some assump- 448  
tions. The method used consists in validating the description 449  
of the not modified building by comparing the simulations 450  
based on a real weather file with the experimental data. Once 451  
the building model is adjusted, the simulations based on 452  
artificial climatic data will make it possible to test the 453  
improvements of the building. 454

### 455 3.3.3. Results of simulations

456 Taking into account the assumptions of simulation, it is 457  
difficult to quantify the condensation phenomena in terms of 458  
mass. We can however, estimate the degree of improvement 459  
obtained by the modifications made to ventilation and to the 460  
frame. Thus, we will evaluate the duration of condensation 461  
in a day. The importance of the phenomena of condensation 462  
will be expressed as a percentage of time, calculated over 1 463  
AD and ED. Comparing the surface temperatures of the 464  
various walls with dew point temperature of the modelled 465  
zone will highlight the appearance of condensation. The 466  
results for the site one and two, located at 800 and 400 m of 467  
altitude, are recapitulated in the following Table 3.

468 It thus, appears that the modifications suggested bring a 469  
noticeable improvement and make it possible to eliminate 470  
the risks of condensation on the walls.

## 471 4. Preventive study

### 472 4.1. Introduction

473 As we have seen it, condensation on the walls generates 474  
significant problems of maintenance for the building owners.

**Table 3**  
Results of simulations

|             | Ventilation | Insulation of the roof | Insulation of the walls | Rate of occurrence of condensation (%) |                |                        |                |
|-------------|-------------|------------------------|-------------------------|--|----------------|------------------------|----------------|
|             |             |                        |                         | Site 1: "Le Tampon"                    |                | Site 2: "L'Entre-Deux" |                |
|             |             |                        |                         | On the walls                           | On the ceiling | On the walls           | On the ceiling |
| Average day | No          | No                     | No                      | 60                                     | 60             | 68                     | 71             |
| (AD)        | Yes         | Yes                    | No                      | 8                                      | 0              | 12                     | 0              |
| Extreme day | Yes         | Yes                    | Yes                     | 0                                      | 0              | 0                      | 0              |
| 9ED)        | No          | No                     | No                      | 69                                     | 70             | 71                     | 71             |
|             | Yes         | Yes                    | No                      | 34                                     | 4              | 21                     | 17             |
|             | Yes         | Yes                    | Yes                     | 0                                      | 0              | 0                      | 0              |

475 In order to prevent degradations in new buildings and to  
 476 reduce the maintenance cost, a study was undertaken to  
 477 predefine the provisions to implement. Simulations were  
 478 carried out on a project of social housing in a very wet area  
 479 of Reunion Island.

480 **4.2. The building under study**

481 The study relates to a housing project of 40 social houses  
 482 established in "la Plaine des Palmistes" located at 1000 m  
 483 of altitude. The weather conditions of this site are charac-  
 484 terized by an abundant pluviometry involving a strong  
 485 relative humidity. The average temperature and relative  
 486 humidity are 15.4°C and 74.4%. The buildings are made  
 487 of timber and built on ground or crawl space. An example of  
 488 a housing on ground is presented in Fig. 9.

489 **4.3. The simulations**

490 The objective of the simulations is to bring supports to the  
 491 designers of the buildings confronted with the problems of  
 492 condensation. Thanks to the result of the curative study,  
 493 some improvements were made concerning mainly the  
 494 insulation of walls, roofs and the materials used. Through  
 495 these simulations, we try to evaluate the influence of the

496 ventilating systems or heating, the behavior of the glazings,  
 497 the influence of the nature of the ground and the handling of  
 498 the cold bridges.

499 In order to consider the strongly hygroscopic character of  
 500 the buildings structure it is necessary to use a simulation  
 501 code integrating materials behavior. This model were not  
 502 integrated in CODYRUN at the date of the study. We used  
 503 TRNSYS of which the multi-zone building model (type 56)  
 504 take into account the quantities of water stored in materials  
 505 constituting the envelope or the furniture in the zone. Not  
 506 having experimental weather data for the studied site we  
 507 worked out artificial climatic sequences using the weather  
 508 generator RUNeole.

509 Considering the strongly hygroscopic behavior of the  
 510 buildings, we carried out simulations with average weather  
 511 data but over one long period. The hourly weather data file  
 512 used extends over 492 days comprising two southern winters  
 513 allowing taking into account the sorption and desorp-  
 514 tion cycling.

515 The housing description is based on the elements of the  
 516 file drawing project description. The panes of glass are  
 517 single and without solar protection. The walls are con-  
 518 structed according to the regulation of wood structure  
 519 buildings. The internal loads take into account the sensible  
 520 and latent heat releases related to the occupants and their

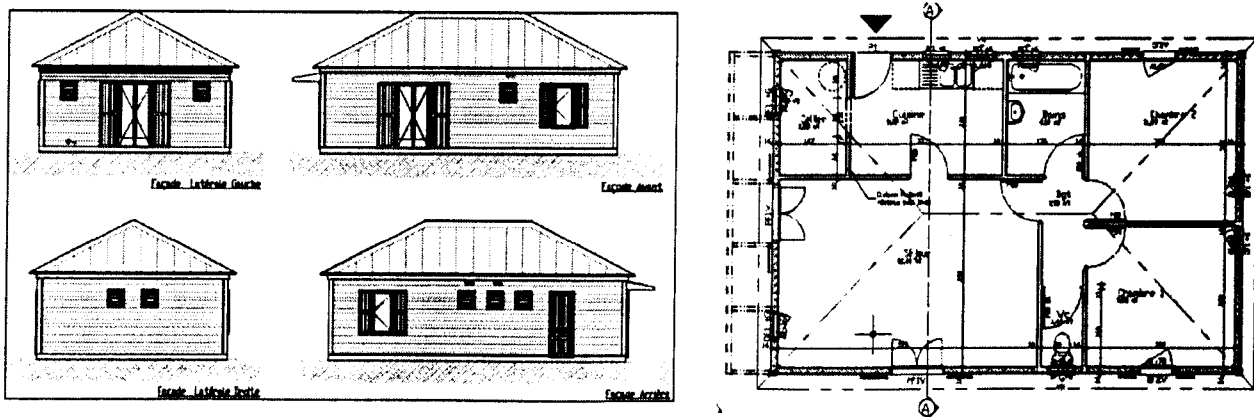


Fig. 9. Timber housing tested in the preventive study.



521 activities and a rate of air infiltration during the day. For  
522 simulations with ventilating system, the fan will be started  
523 according to the moisture releases schedule in the housing.

524 We defined six scenarios to evaluate the influence of the  
525 different parameters. Scenario 1 and 2 evaluate the basic  
526 dispositions (without system) for the case of a building on  
527 the ground and on a crawl space. Scenario 3 analyses the  
528 effect of 80 mm rockwool insulation of the crawl space. The  
529 mechanical ventilation is tested with the scenario 4. Sce-  
530 nario 5 and 6 evaluate influence of heating with two different  
531 temperature set points. The first set point is 20°C, which did  
532 not bring enough improvement on comfort and condensa-  
533 tion. We defined a new set point temperature (22°C), which  
534 leads to wall surface temperatures higher than 19°C.

#### 535 4.4. Simulation results and discussion

536 The importance of condensation phenomena will be  
537 expressed in duration of condensation reported to the dura-  
538 tion of the simulation period and expressed as a percentage.

539 It appears that the different parameters appreciably mod-  
540 ify the behavior of the building vis-à-vis the problems of  
541 condensation. The best results are obtained with the use of  
542 controlled mechanical ventilation; the rate of condensation  
543 on walls is then close to 0%. Heating brings a solution to the  
544 problems of condensation only if the set point temperature is  
545 sufficient.

##### 546 4.4.1. Condensation on pane glass

547 The results of the simulations, based on the use of single  
548 glazing, show that condensation is inevitable whatever the  
549 type of system used. This condensation is aesthetically  
550 annoying but does not involve degradation of the support  
551 as long as there is no streaming on the frontage. It is thus,  
552 necessary to consider the evacuation towards the outside of  
553 condensate. Let us note that condensation on the glazings is  
554 strongly reduced by the use of a ventilation system and that  
555 to make it disappear completely, it will be necessary to use  
556 multiple glazing.

##### 557 4.4.2. Influence of the around

558 The unevenness of the ground requires in certain case the  
559 use of a crawl space. The configurations ground and isolated  
560 crawl space are equivalent. But the presence of a non  
561 isolated crawlspace increases the phenomena of condensa-  
562 tion on the ground, and also on the walls. It then appears that  
563 crawl spaces have to be insulated with at least 80 mm  
564 insulation.

##### 565 4.4.3. Influence of the controlled mechanical ventilation

566 The ventilation of the buildings can be ensured by natural  
567 or controlled distribution. The air circulation in the case of  
568 natural distribution is ensured by thermal buoying or by  
569 overpressure due to the wind on walls. Fluxes not being  
570 controlled, the quantities of air are generally lower or much  
571 higher than the needs. It follows moistures or comfort

disorder because of very low temperatures in the dwellings. 572  
Controlled mechanical ventilation ensures an adjusted air- 573  
flow in housing. Then, direction and quantities of air in 574  
circulation correspond to a precise dimensioning. Simu- 575  
lations show that the mechanical ventilation makes an 576  
unquestionable improvement since condensation almost 577  
disappeared on the walls and on the ground. It remains 578  
on the other walls (doors and glazing) but is strongly 579  
decreased. The periods of condensation correspond to the 580  
periods of strong moisture contribution in the room (hour of 581  
meal). That reinforces the interest of the mechanical venti- 582  
lation whose role is to evacuate these internal loads. If it 583  
appears as an interesting solution against condensation, 584  
ventilation poses the problem of thermal comfort of the 585  
occupants. With ventilation, inside air temperature fre- 586  
quently goes down below 20°C. The average is 18.8°C over 587  
the period of simulation with a minimum of 12.6°C. This is 588  
the reason why many users shut down the system or seal the 589  
exhaust. Besides too significant cooling, users also complain 590  
about noise disturbance or annual cost of ventilation. In 591  
order to reduce the disadvantages related to an excessive 592  
circulation of air, the use of hydro-adjustable ventilation 593  
appears essential. Indeed, this system adjusts the flow 594  
extracted out of the kitchens and the bathrooms to control 595  
the humidity of the building. It thus, avoids over ventilation 596  
of housing while guaranteeing an effective evacuation of the 597  
moisture loads. 598

##### 599 4.4.4. Influence of heating

Scenarios 5 and 6 evaluate the influence of a heating 600  
system. Ventilation, in this case, will be ensured by natural 601  
means. The improvement made by a heating with a 20°C set 602  
point being tiny, we carried out simulations with a set point 603  
of 22°C. This value gives similar results as the mechanical 604  
ventilation, concerning the problems of condensation. A dry 605  
air temperature of 20°C is not sufficient to increase the 606  
temperatures of surface, which can go down under 17°C. 607  
Condensation persists since the temperature of dew of the air 608  
remains unchanged. Moreover, the conditions of comfort are 609  
not improved because the resultant temperature remains low. 610  
A heating with 22°C ensures a relative comfort with surface 611  
temperatures not going down below 19°C. This solution is 612  
possible only if the users can afford the annual energy 613  
expenditure. The yearly consumption of the heating will 614  
be about 7000 kWh. This expensive solution prevents con- 615  
densation in the building and ensures comfort to the inha- 616  
bitants. 617

#### 618 5. Conclusion and outlines

619 Our approach to study condensation phenomena uses a  
620 first experimental step. These experiments aim at defining  
621 the significant points of an existing building envelope  
622 regarding to condensation phenomena and validate the  
623 useful data for the building description. The measurements



## BRINGING SIMULATION TO IMPLEMENTATION: PRESENTATION OF A GLOBAL APPROACH IN THE DESIGN OF PASSIVE SOLAR BUILDINGS UNDER HUMID TROPICAL CLIMATES

F. GARDE\*<sup>†</sup>, T. MARA\*, A. P. LAURET\*, H. BOYER\* and R. CELAIRE\*\*<sup>†</sup>

\*Laboratoire de Génie Industriel, IUT de Saint Pierre, University of Reunion Island,  
40 Avenue de Soweto, Saint-Pierre, Reunion Island, 97410, France

\*\*Concept Energie, 1 Rue Mirabeau, Lambesc, 13410, France

Received 31 July 2000; revised version accepted 8 January 2001

Communicated by ANNE GRETE HESTNES

**Abstract**—In early 1995, a DSM pilot initiative was launched in the French islands of Guadeloupe and La Reunion through a partnership between several public and private partners (the French Public Utility EDF, the University of Reunion Island, low cost housing companies, architects, energy consultants, etc . . . ) to set up standards to improve thermal design of new residential buildings in tropical climates. This partnership led to defining optimized bio-climatic urban planning and architectural designs featuring the use of passive cooling architectural principles (solar shading, natural ventilation) and components, as well as energy efficient systems and technologies. The design and size of each architectural component with regard to internal thermal comfort in buildings has been assessed with validated thermal and airflow building simulation software (CODYRUN). These technical specifications have been edited in a reference document which has been used to build over 800 new pilot dwellings through the years 1996–2000 in Reunion Island and in Guadeloupe. Monitoring experiments were held in these first ECODOM dwellings in 1998 and 1999. This resulted in experimental validation of the impact of the passive cooling strategies on the thermal comfort of occupants leading to the modification of specifications when necessary. The paper presents all the methodology used for the application of ECODOM, from the simulations to the experimental results. This follow up is important, as the setting up of the ECODOM standard will be the first step towards the introduction of thermal regulations in the French overseas territories, by the year 2002. © 2001 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

### 1. INTRODUCTION

Each year 20,000 dwellings are built in the French Overseas Territories. There are four French Overseas Territories (called DOM): two islands are located in the Caribbean (Martinique and Guadeloupe), one island is situated 400 km to the east of Madagascar in the Indian Ocean (Reunion Island) while the fourth DOM (French Guyana) is in South America north of Brazil. Each one of these DOM experiences a hot and humid climate, tropical for the islands of Guadeloupe, Martinique and Reunion and equatorial for French Guyana. Two thirds of these new dwellings are community housing. Initially these new dwellings were built without air conditioning or hot water. This situation has led to haphazard installation of instant electrical hot water boilers and poorly located, designed, sized, and maintained individual air

conditioning systems. The lack of building codes for the thermal design of buildings, combined with designs better adapted to temperate climates together with economic constraints of tight budgets for public constructions have led to the development of buildings totally unfitted to the tropical climate. Large population increase in these DOM, rise in living standards, and the decreasing costs of air conditioning systems have resulted in a real energy, economical and environmental problem.

When considering economical aspects, high electricity production costs also create regular high deficits for the French Electricity Utility (EDF). EDF loses 350 million Euros every year in the overseas territories. The average selling price of electricity is less than 9 Euro cents (less than half the real production–distribution cost) because of the French pricing policy (the billing price of electricity is the same as in mainland France).

All these factors show that passive solar cooling in the thermal design of buildings is of great economical, social and environmental relevance.

<sup>†</sup>Author to whom correspondence should be addressed.  
Tel.: +262-962-891; fax: +262-962-899;  
e-mail: garde@univ-reunion.fr

<sup>†</sup>ISES member.

A long term overall program to improve comfort and energy performance in residential and commercial buildings has been set up in these DOM. In the new housing sector, a standard quality label has been launched concerning the building envelope, hot water production systems and air conditioning systems and components.

## 2. THE ECODOM STANDARD

A Demand Side Management pilot initiative called ECODOM was launched in early 1995 in the French islands of Guadeloupe and Reunion through a partnership between the French electricity utility (EDF), the French authority for environment and energy conservation (ADEME), the ministries of Housing, of Industry and of Overseas Territories, the University of Reunion Island and several other public and private partners, such as low cost housing companies, architects, energy consultants, etc.

The ECODOM standard aims to facilitate construction of naturally ventilated comfortable dwellings whilst avoiding the usual need for electrically driven compression air cooling. The ECODOM standard provides simple technical specifications to do so, at an affordable price.

The existing bibliography on the passive thermal design of buildings is extremely rich and varied. Publications often focus either on the optimization of one component of a building (Bansal *et al.*, 1992; Malama and Sharples, 1996; Rousseau and Mathews, 1996; Peuportier and Michel, 1995) or on the presentation of an improved bio-climatic project (Filippin *et al.*, 1998; Ashley and Reynolds, 1993) or on a global approach to building with a description of the passive solar strategies to implement it (Garg, 1991; Hassid, 1986; Millet, 1988; Gandemer *et al.*, 1992). These publications often have an obvious interest for building physicists but cannot be easily applied in a national overall program to generalize the improvement of the thermal performances of buildings: because scientific preoccupations are often far from economical building reality. In addition architects and engineers lack the time to learn to use scientific tools and to read research reports in the fields of thermal design of buildings. Thus, to bridge the gap between building designers and building physicists, a simple, straightforward and pedagogical language must be used. This is why one of the objectives of the ECODOM project was to define simple rules which can be easily understood by the whole building community.

Finally, ECODOM also has social objectives because more than half of the 20,000 dwellings in the French overseas territories are built by public housing companies. ECODOM allows us to give basic thermal comfort to people who will never be able to invest in air conditioning and the consequent electricity bills.

## 3. METHODOLOGY

The methodology used consisted in different phases from 1994 to the present time. As shown in Fig. 1, the main steps were to:

- identify the specifications that have to be considered in the building;
- run simulations on each specification (solar protection of the roof for example) on typical local dwellings and edit a pedagogical document containing all the passive cooling solutions;
- implement the solutions on projects and have an experimental validation through a technical and sociological monitoring.

### 3.1. The specifications

Comfort level is reached through an architectural building design adapted to the local climate: the dwelling is protected from the negative climatic parameters (mainly the sun) and benefits from positive climatic factors (the wind).

Achievement of a good level of thermal comfort requires respecting various compulsory rules. These rules concern the immediate surroundings of the dwelling and envelope components. These rules cover five issues.

1. Location on site (vegetation around the building).
2. Solar protection (roof, walls, windows).
3. Natural ventilation (exploitation of trade winds, and optimized ratio of inside/outside air-permeability of dwelling envelope) or mechanical ventilation (ceiling fans).
4. Domestic hot water production (solar water heaters, efficient gas water heaters or properly designed off-peak hours servo-controlled high efficiency storage electric water heaters).
5. As an option, high efficiency intermittent air conditioning systems for bedrooms (air tightness of rooms, efficient components, controls, ...).

### 3.2. The simulations

To define these quality standards specifications, a large number of simulations were computed for each component of the building envelope in order

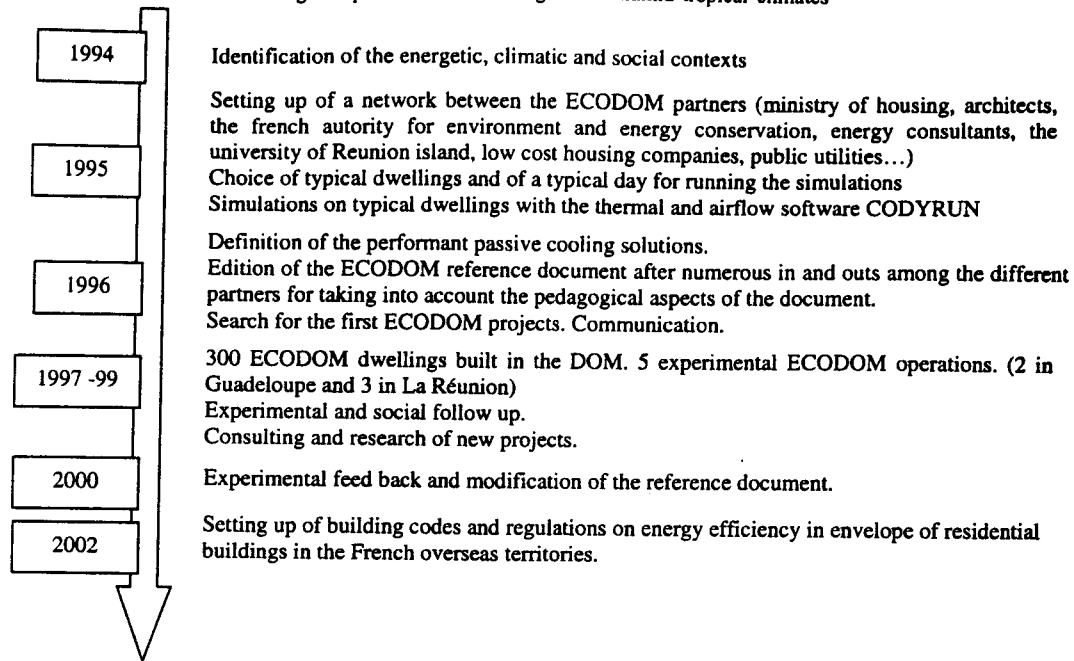


Fig. 1. The whole ECODOM process.

to quantify the thermal and energetic impact of each one on the thermal comfort within the building. Various authors have already worked on specific issues concerning the outside structure of the building: Bansal *et al.* (1992) on the effect of external colour, Malama and Sharples (1996) on passive cooling strategies for roofs and walls, Rousseau and Mathews (1996) on the effect of natural ventilation, De Waal (1993) on global considerations for a building adapted to a defined climate.

Our approach consisted in studying typical dwellings, selected as being the most representative types of the ones built in the Reunion Island, in terms of architecture and building materials (see Fig. 2).

Simulations were carried out with the use of a building thermal and airflow simulation software on envelope components (roof, walls, windows) and on natural ventilation, in a way allowing to estimate the influence of each one of the above specifications in terms of thermal comfort and energetic performances. To compare the effect of each component modification, the comparison criteria were the resultant temperature (passive dwelling) and the cooling consumption of an ideal system with a set temperature at 25°C. The simulations were carried out for the condition of closed windows and no air renewal, as we were interested only in the thermal response of the envelope. For the optimization of natural ventilation, the simulations were carried out for the

condition of 'open window' by testing different percentage and coupling of interior and exterior permeabilities. Further information is available in Garde *et al.* (1999a).

This has led to the definition of efficient passive technical specifications for each part comprising the building envelope and likewise to a minimum porosity ratio for optimizing natural ventilation. These simulations, their analysis and

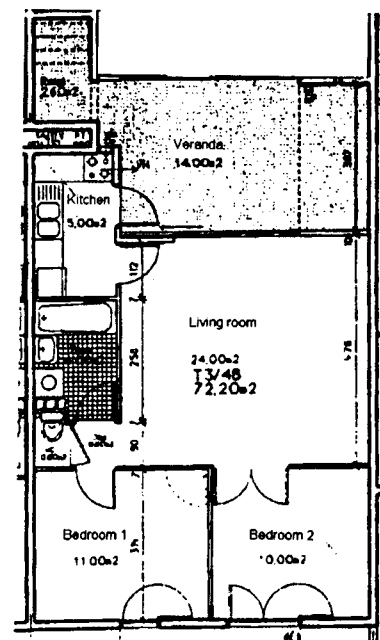


Fig. 2. Typical dwelling.

synthetic results have been presented in Garde *et al.* (1999a,b).

A reference document comprising a pedagogical presentation of the passive technical options was published in 1996. This document enables all building designers to speak the same language in the study of future ECODOM buildings.

### 3.3. Implementation and experimental feedback

Once the document was made, the next step was obviously to implement the standard to new dwellings. A total of 800 pilot dwellings were built according to the ECODOM specifications throughout the years 1996–2000. A technical and sociological validation period was launched in the first ECODOM operation for 2 years. Section 4 will describe the implementation and the results.

Then, thanks to the experimental feedback, the main objectives are to expand this pilot phase to the residential sector on a much broader scale (with the objective of 2000 new dwellings per year), complete similar global energy efficiency projects in existing housing and in large and medium size commercial buildings, and plan the thermal regulations in the new housing sector by the year 2002 (see Fig. 1).

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1. Simulation results: the ECODOM reference document

We will illustrate below some of the final results which are presented in the ECODOM reference document (Célaire, 1997). This reference document is essential since it is used as a common tool for study and design of new ECODOM projects by architects, building physicists and engineers.

**4.1.1. Solar protection.** In humid tropical climates, the source of discomfort is the internal temperature increase due to poor architectural design, primarily due to lack of solar protection

(shading). Of temperature rises, 80% are due to solar radiation and the remaining to conduction exchanges. Setting up efficient solar protection specifications is a fundamental step in the thermal design of buildings. This protection concerns all external components of the dwelling envelope: roof, walls and windows.

**4.1.2. Solar protection of the roof.** Roofs can account for up to 60% of overall envelope heat gains in dwellings. Efficient solar protection of roofs is therefore of prime concern for optimal thermal design.

The following table is valid for terraced roofs, tilted roofs without attics, or roofs with closed or barely ventilated attics.

Table 1 only gives results for polystyrene and polyurethane, as these types of insulation are the most commonly used at an affordable price in humid tropical climates. Other alternatives exist (low emissivity materials for instance) and can be used if their equivalent thermal resistance is sufficient compared to values given in Table 1.

**4.1.3. Solar protection of walls.** Thermal gains from walls account for 20 to 30% (40 to 65% for dwellings which are not under a roof) of overall envelope heat gains in dwellings. Various solutions enable efficient solar protection of walls from sunlight: horizontal or vertical overhangs or sun-breakers, or thermal insulation. Results obtained from simulations lead to Table 2 which gives, for Reunion Island, optimum dimensions of overhang according to wall orientation and to wall thermal resistance.

When walls do not have overhangs or shading systems, the minimum required insulation thickness (in cm) for the various types of walls and various orientations are shown in Table 3.

If values of  $d/h$  seem excessive, other alternatives such as vertical shading systems or double-skin systems with ventilated air-gaps may be considered. In this case, no sizing specifications are needed for each wall orientation (shading effect is sufficient whatever the orientation is

Table 1. Roof solar protection

| Roof colour                       | Polystyrene type insulation<br>$\lambda=0.041$ W/m K | Polyurethane type insulation<br>$\lambda=0.029$ W/m K |
|-----------------------------------|--|---|
| Insulated simple roofs            |  |   |
| Light ( $\alpha=0.4$ )            | 5 cm   | 4 cm  |
| Medium ( $\alpha=0.6$ )           | 8 cm   | 6 cm  |
| Dark ( $\alpha=0.8$ )             | 10 cm  | 8 cm  |
| Roofs with well-ventilated attics |  |   |
| Light ( $\alpha=0.4$ )            |  | No insulation needed                                  |
| Medium or dark ( $\alpha=0.6$ )   | 2 cm   | 1 cm  |

Table 2. Overhang — minimum  $d/h$  ratio values to be respected

| Type of wall   | Light colour |       |      |       | Medium colour |       |      |       |
|--|--------------|-------|------|-------|---------------|-------|------|-------|
|  | East         | South | West | North | East          | South | West | North |
| Poured concrete 15 cm ( $R=0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )  | 0.4          | 0.2   | 0.7  | 0.5   | 1             | 0.5   | 1.3  | 0.7   |
| Hollow concrete blocks ( $R=0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ) | 0.1          | 0.1   | 0.3  | 0.2   | 0.5           | 0.3   | 0.8  | 0.5   |
| Wood ( $R=0.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )                   | 0            | 0     | 0    | 0     | 0             | 0     | 0.2  | 0.1   |

Table 3. Insulation of walls (in cm) for different orientations and external colours (for a conductivity of  $0.041 \text{ W/m K}$ )

| Type of wall   | Light colour |       |      |       | Medium colour |       |      |       |
|--|--------------|-------|------|-------|---------------|-------|------|-------|
|  | East         | South | West | North | East          | South | West | North |
| Concrete 20 cm ( $R=0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )         | 1            | 1     | 1    | 1     | 2             | 2     | 2    | 2     |
| Hollow concrete blocks ( $R=0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ) | 1            | 1     | 1    | 1     | 1             | 1     | 2    | 2     |
| Wood ( $R=0.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )                   | 0            | 0     | 0    | 0     | 0             | 0     | 1    | 1     |

provided the shading component covers the entire wall surface). Meanwhile, these solar shading principles and sizing values are fully compatible with the creole architectural components such as verandas and balconies, which ensure efficient solar protection of dwelling walls and windows, and also create outdoor living spaces.

**4.1.4. Solar protection of windows.** Solar protection of windows is essential, not only because they account for 15 to 30% of overall envelope heat gains in dwellings but also because they contribute to increasing discomfort experienced by occupants, due to the instant heating of ambient air temperature and an exposure to direct or reflected sunlight. All windows must therefore be protected by some kind of window shading system, such as horizontal overhangs and other shading devices such as venetian blinds or opaque, mobile louvers (see Fig. 3). Simulations allow us to optimise the geometric characteristics of horizontal overhangs in relation to glazing (see Table 4).

**4.1.5. Natural ventilation.** In warm climates, natural ventilation is the most common means of cooling both occupants and buildings.

Natural ventilation, depending on flow-rate

Table 4. Values of  $d/(2a+h)$  (case 1), or  $d/h$  (case 2)

|                | Orientation of windows |       |      |       |
|----------------|------------------------|-------|------|-------|
|                | East                   | South | West | North |
| Reunion Island | 0.8                    | 0.3   | 1    | 0.6   |

values (or air change per hour), can ensure three functions:

- weak flow-rate (1 to 2 ACH): preservation of hygiene conditions in building by internal air renewal;
- moderate flow-rate (40 ACH): dissipation of internal heat gains and cooling of building envelope;
- high flow-rate (more than 100 ACH): improvement of comfort of occupants by increasing heat transfer at skin level.

High air speed and even distribution of air flow through dwelling increases sudation process. This is the only way of creating cooling flows by compensating for simultaneous high temperatures and high hygrometry.

Our aim is therefore to find exterior/interior walls' porosity coupling enabling us to reach 40 ACH. On the one hand the dwelling envelope will be sufficiently cooled and on the other hand, such ACH values allow us to benefit from wind speeds of  $0.2$  to  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ , which are largely

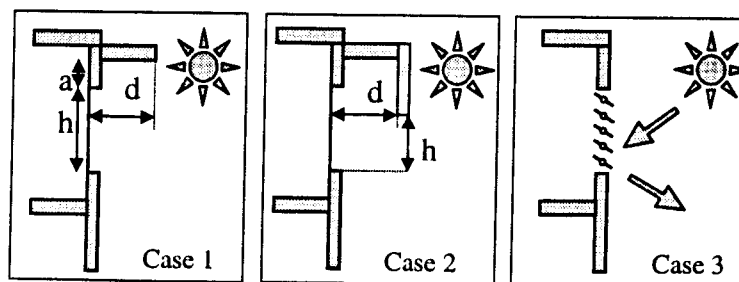


Fig. 3. Some of the shading devices required by ECODOM.

sufficient, when taking into account climatic parameters (outside temperature seldom greater than 32°C), to insure a good comfort level.

Simulations run in Garde *et al.* (1999a,b) and Garde (1997) showed that the critical rate of 40 ACH is obtained for designs with minimal exterior and interior porosities of 25% whether the building is of low or high mass. Natural ventilation is more effective during night time for heavy structures, whereas in light structures it serves mainly to evacuate daytime overheating.

Thus dwellings should have layouts allowing for effective cross ventilation of all rooms (see Fig. 4). At each level or floor, there should exist openings in each main room, on at least two opposite facades (main rooms being bedrooms and the living room, the dining room and other living spaces). Interior lay-out should also be designed to allow outside air to flow through main rooms from one facade to the other through halls, corridors, doors and other internal openings in room partitions.

Calculation details needed to determine the exterior and interior porosities are shown by Eqs. (1) to (5). The first step is to calculate the mean porosity of two opposite facades of dwelling. Then, the internal and external porosities required by ECODOM standards are at least 25% of the mean

$$P_1 = \frac{So_1}{Sp} \geq 0.25 \quad (1)$$

where  $So_1$  is the net surface area of external openings, main rooms (façade 1);

$$P_2 = \frac{So_2}{Sp} \geq 0.25 \quad (2)$$

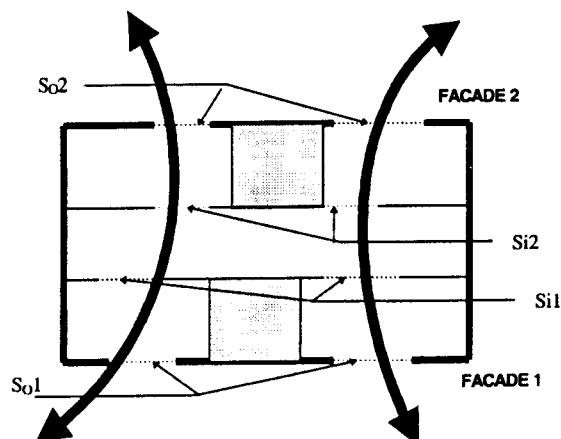


Fig. 4. Cross ventilated dwelling.

where  $So_2$  is the net surface area of external openings, main rooms (façade 2);

$$Sp = \frac{Sp_1 + Sp_2}{2} \quad (3)$$

where  $Sp_1$ ,  $Sp_2$  are the total surface area of façades 1 and 2 of main rooms;

$$Si_1 \geq So_1 \text{ or } So_2 \quad (4)$$

$$Si_2 \geq So_1 \text{ or } So_2 \quad (5)$$

where  $Si_1$  and  $Si_2$  are the total surface area of internal openings.

**4.1.6. Domestic hot water.** It is essential that the dwellings are equipped with domestic hot water heating systems which are energy efficient, long-lasting and economic. Water heating can be solar, electric or gas or a combination of such systems.

In the case of solar water heaters for example, the system must conform to technical control by the French centre for scientific and technical building studies (C.S.T.B.). Total minimum solar collector areas should be defined in relationship to the size of the dwelling (see Table 5). The capacity of the water storage tank should be 60 to 120 l per square metre of the net collector area. Conventional minimum annual productivity should be 700 kWh per net square metre of the collector area.

As far as electrical heaters are concerned, they must feature an approved French standard manufacturing seal (Norme Française). The minimal capacity of the water heater and the maximum value of the cooling constant (defining the storage efficiency of heaters), depending on the number of main rooms in the dwelling, are required.

#### 4.2. Implementation of the ECODOM specifications on a project

To date, 10 experimental projects have been built in Reunion Island, and two in Guadeloupe, which represent a total number of 800 dwellings.

Table 5. Technical characteristics — solar water heaters

| Solar water heaters   |                    |
|---|--------------------|
| Minimum collector area to be installed for various types of dwellings |                    |
| F1-F2 (2 rooms)   | 1.5 m <sup>2</sup> |
| F3 (3 rooms)  | 2.0 m <sup>2</sup> |
| F4 (4 rooms)  | 2.5 m <sup>2</sup> |
| F5 (5 rooms)  | 3.0 m <sup>2</sup> |
| F6 and more   | 3.5 m <sup>2</sup> |

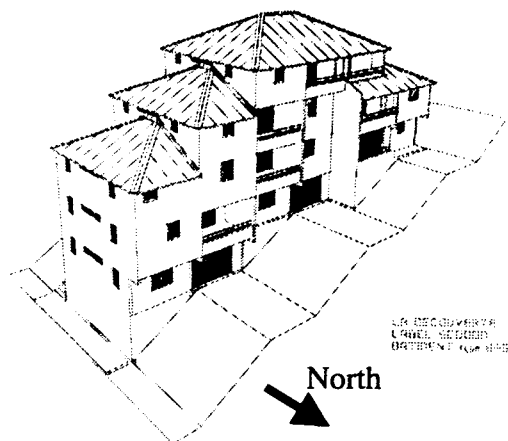


Fig. 5. ECODOM 'La Découverte' — the original project (1996).

One of these called 'La Découverte' is represented in Fig. 5.

A total of 44 dwellings were studied with the ECODOM specifications as part of the 'La Découverte' project.

This project started in 1996 when first contacts were made with the project architect and the owner of the building.

The main difficulty was the creation of a confident working relationship between physicists and engineers in charge of promoting the ECODOM concept and the project architect: to be successful, it was important that the ECODOM design approach should not be seen as a factor limiting architectural creativity.

Fig. 6 illustrates the project after the application of ECODOM specifications.

The ECODOM modifications applied to the project are explained below.

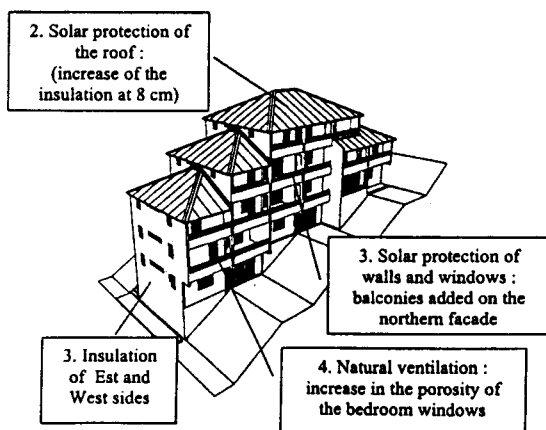


Fig. 6. Modifications of the original project (1997).

No modification was made regarding site location because gardens around buildings had already been planned. In addition, the project already had an optimal orientation as the main facades face north and south, with limited west and east wall exposure to morning and afternoon low incident sunrays. Thus the only facade to be upgraded was the northern one, as the southern one is seldom exposed (for the southern hemisphere latitude of Reunion Island, the midday sun only shines on southern facades in December).

As far as solar protection of the roof was concerned, the architect had already planned 5 cm insulation for red and blue roofs. According to Table 1, this is not enough. Therefore, he was asked to increase the insulation thickness up to 8 cm (the value for medium colours) and to use polystyrene as insulation rather than mineral wool. Mineral wool is fairly cheap but not very well adapted to tropical climates: it loses its thermal properties when it absorbs ambient humidity.

As far as solar protection of walls is concerned, the colour is light and materials used are hollow concrete blocks. In Table 2, it is specified to install 1 cm insulation on east and west sides. The southern facade was not insulated because it is protected by overhangs. In addition as the initial project did not provide solar protection for bedroom windows, it was specified to add overhangs on exposed windows of the northern facade.

However, the solar protection of windows is strongly correlated to the natural ventilation. The longer the opening, the wider the overhang must be.

Concerning natural ventilation, the dwelling porosity in the initial project was insufficient. For example, ECODOM standards require a 2 m<sup>2</sup> porosity for bedrooms whereas the initial project only had 1.44 m<sup>2</sup>. This is why all the original windows have been replaced by glazed doors in order to increase porosity. To reach the same porosity indoors, we requested that fans should be added above the bedroom doors. Balconies were also added all along the facade for solar protection of windows and of walls (see Fig. 7).

All the modifications expressed above have been taken into consideration by the architect and integrated into the final project which is represented by Fig. 8. The operation 'La Découverte' ended in April, 1999, which was 3 years after our first contacts with the people responsible for the project. We also completed the phase of technical support in the thermal conception to the phase of implementation of the project. To make the



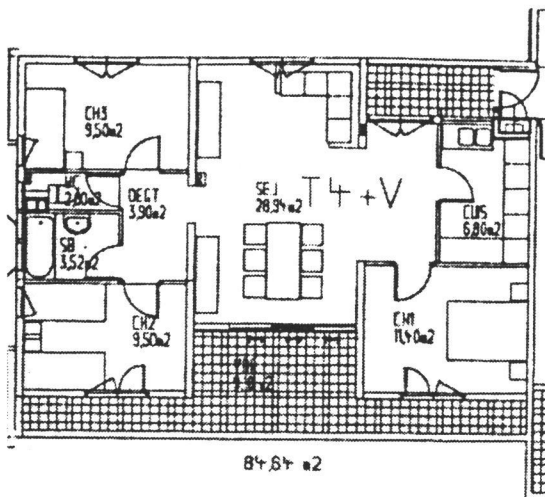


Fig. 7. Floor plan of an ECODOM dwelling. Increase in porosity of bedrooms (glazed doors) and solar protection of northern facade (balconies).

methodology complete, it only lacks the experimental monitoring and feedback, which will be presented in the following section.

#### 4.3. Implementation results: technical and sociological monitoring

4.3.1. *Description of the monitoring.* A monitoring was launched for the first ECODOM dwellings in order to validate the experimental impact of the passive cooling specifications on the

performances of the envelope of the building and on the occupant comfort.

The instrumentation campaigns were carried out during the first two ECODOM projects implemented in Reunion: the first one is presented in this paper and the second, which was built 1 year earlier, is called 'La Trinité'.

Our first objective was to test the performances of the buildings without the occupants. In this way, we were able to make our own measurement scenarios and modify the configuration of the apartments without disturbing the tenants. Secondly, we undertook a measurement campaign in occupied flats (for 'La Trinité' only) to test the dwellings in a real situation.

The measurement results and analyses have been supplemented for both projects by a sociological survey in inhabited dwellings in order to understand how thermal comfort, acoustic comfort (in tropical climates, it might be difficult to obtain thermal comfort and acoustic comfort at the same time), visual comfort and dwelling environment are experienced by the occupants

Table 6 gives the schedule of the measurement campaigns for the two operations.

These campaigns took place during the two last summers (in 1998 for 'La Trinité' and in 1999 for 'La Découverte') in order to assess the thermal performance of flats during extreme climatic spells (the hot and wet season in Reunion occurs from the middle of December to the middle of April). The sociological survey was performed for

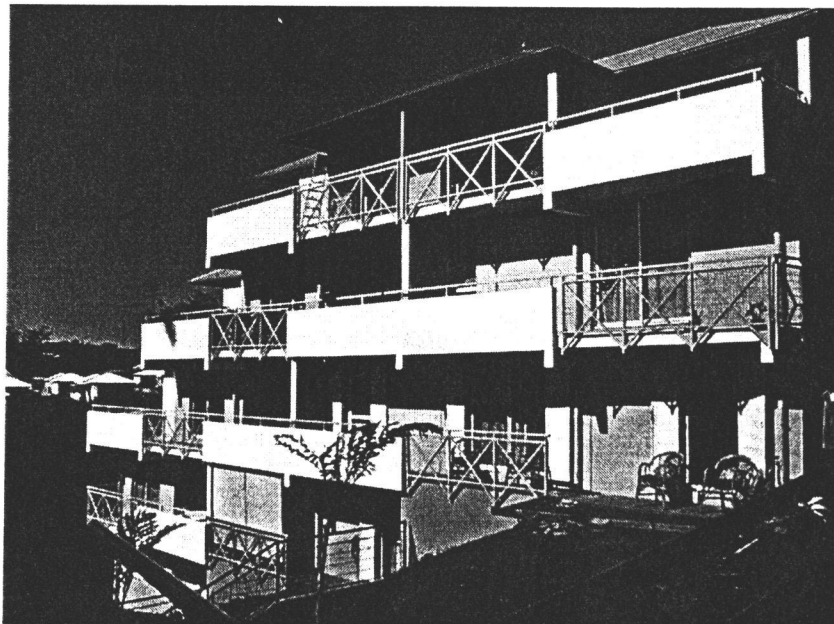


Fig. 8. The final project (April 1999).

Table 6. Experimental schedule for non occupied and occupied periods

|                 | Non-occupied period         | Occupied period           |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|
| 'La Découverte' | From January to April, 1999 | No measurement            |
| 'La Trinité'    | From January to May, 1998   | From March to April, 1998 |

the project 'La Trinité' in April, 1998 and it was also scheduled for 'La Découverte' for April, 2000.

With the agreement of the housing companies, in each case ('La Trinité' and 'La Découverte') four dwellings were instrumented during the hot season. Dwellings were selected in order to allow for comparison and studies of various parameters such as roof and wall thermal insulation, and natural ventilation. Thus we chose a flat under a roof next to the gable and the same flat at a lower level to test the influence of the roof and of the solar protection of the glazings. The two other instrumented flats were identical in orientation and in level and floor, in order to test different scenarios such as the effect of natural ventilation with one flat used as a control and the second in which we modified its configuration.

A portable data-logger was set up close to the buildings to record all the climatic data (external temperature and humidity, direct and diffuse solar radiation, wind speed and wind direction).

During non-occupied periods, the sensors used were thermocouples for measurement of indoor air temperature, resultant temperature and surface temperatures on walls and roofs; thermo-hy-

grometers for the relative humidity, and accurate anemometers for indoor air speed (see Fig. 9). Data were collected every minute and the average was calculated every hour.

During occupied periods, the sensors were like small 'white boxes' with internal memory which could be wall mounted. They gave temperature and hygrometry measurements every 30 min over several months.

#### 4.4. Presentation of some experimental results

In this section, we shall present only some significant experimental results. The entire results and their analysis are contained in two research reports (one for the operation 'La Trinité' and one for the operation 'La Découverte') available from the authors.

*4.4.1. Impact of the solar protection of roof.* The insulation of the roof is a first priority in solar protection within the framework of the ECODOM process. To demonstrate the influence of the roof, we have instrumented two identical apartments (the same as the one in Fig. 8) but with one under the roof and the other one at a lower level. In this case, when the two apartments are closed, the gap

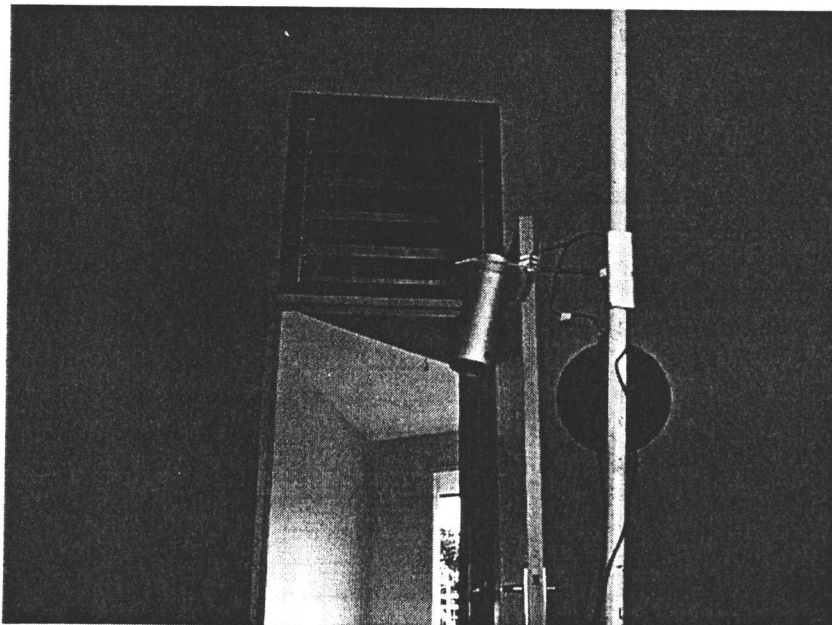


Fig. 9. Measurements of indoor air and resultant temperature inside dwelling.

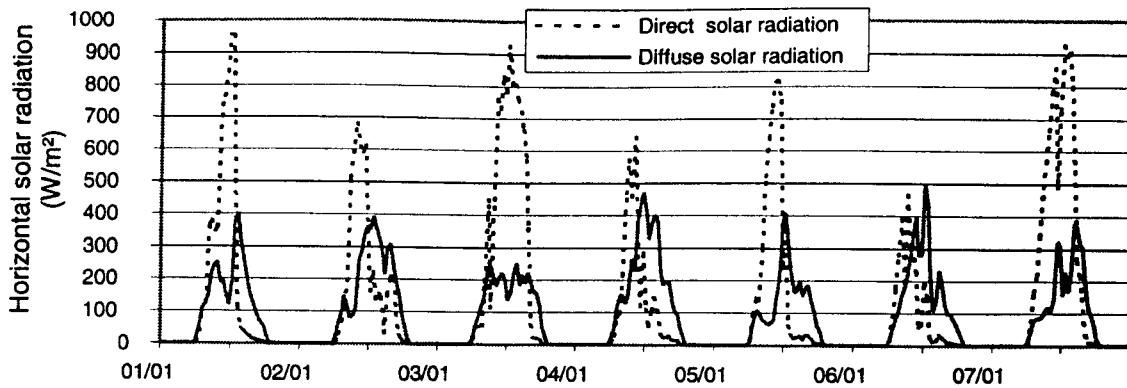


Fig. 10. Solar radiation during the assessment of the solar protection of the roof.

between the indoor resultant temperature is only due to the energetic contribution of the roof.

Figs. 10 and 11 show respectively the solar radiation during the period of the instrumentation and the evolution of the indoor resultant temperatures in the two apartments. A consistent 1 to 1.5°C offset is observed between the two apartments during the whole period of measurement. The same result was found for the two measurement campaigns ('La Trinité' and 'La Découverte'): a flat under the roof with good insulation corresponding to ECODOM always has a resultant temperature above 1 to 1.5°C higher than the flats which are not under the roof. With a poorly designed roof, differences of more than 3°C are observed. This type of measurement confirms the major importance of good insulation of the roof in tropical climates.

**4.4.2. Occupied period (operation 'La Trinité').** The results presented here were obtained in an occupied flat of the operation 'La Trinité'. The period of instrumentation lasted 2 months (in March and April, 1998). The instrumented flat was on a split level. The first level included two bedrooms, the kitchen and the dining room. The

upper level under the roof included only a third bedroom. This flat failed the ECODOM specifications in two respects: the first concerned the insulation of the roof which was only 5 cm thick whereas ECODOM requires 10 cm (the roof was grey in colour). The second concerned the ventilation of the bedroom under the roof: the percentage of ventilation was significantly lower than the percentage required by ECODOM (1 square metre instead of 2 square metres).

Figs. 12 and 13 show the set of temperature/

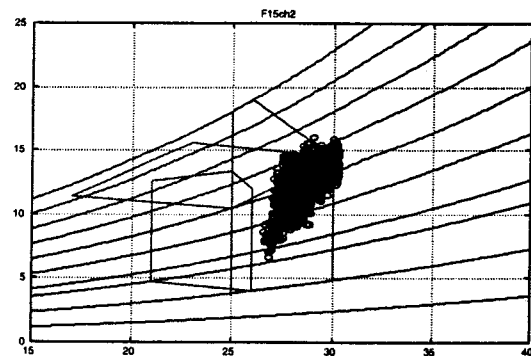


Fig. 12. Temperature/humidity couples of an occupied flat, room at intermediate level.

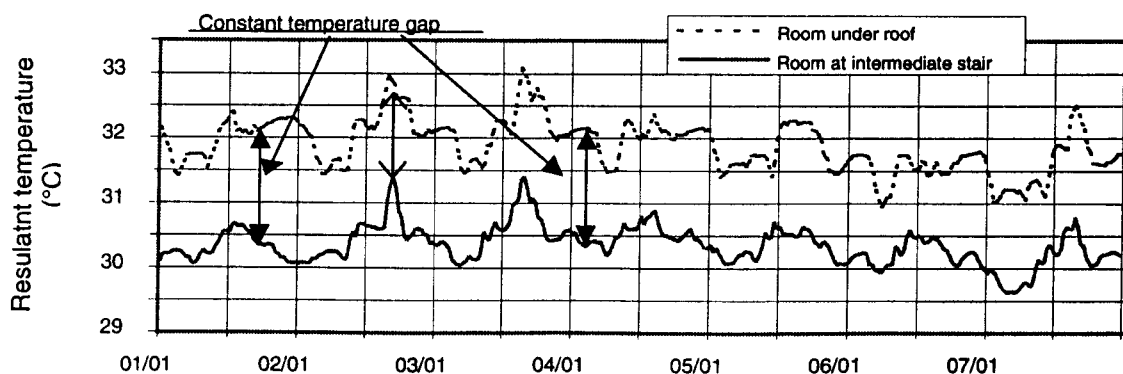


Fig. 11. Comparison of the resultant temperature in two dwellings (one under roof and the other one at intermediate level).

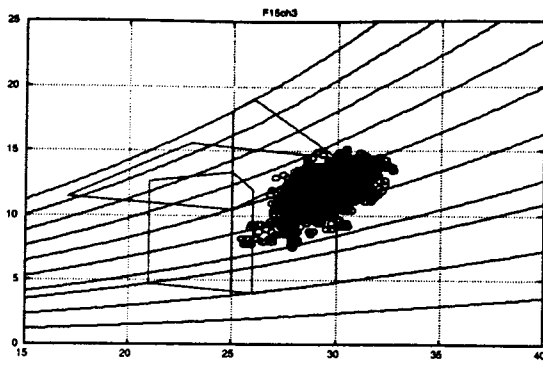


Fig. 13. Temperature/humidity couples of an occupied flat, room under roof.

humidity readings over the period of instrumentation for a room (bedroom 2) on the first level and for the room under the roof (bedroom 3).

We observed that those rooms which are not under the roof and also naturally well ventilated have the same global thermal and airflow behaviour, which is represented by Fig. 12. We are on average 10% outside the comfort zone.

The room (bedroom 3) under the roof is very hot. The distribution of the points on the psychrometric chart is spread over the axis of the resultant temperatures. Although this room is naturally ventilated and is often used by the tenant, we are outside the comfort zone 40% of the time. It is not in fact the way of living that influences the thermal behaviour of the room, but rather a problem of insufficient heat insulation.

In any case, we can suppose that the cross ventilation of the room is obviously insufficient.

#### 4.5. Summary

Experimental and sociological results will enable us to have feedback information about ECODOM dwellings and to supply possible appropriate corrections to quantitative values of passive solar specifications. Above all, experimental feedback allows us to know if dwellings are well adapted to the occupant's way of life.

We cannot mention every feature of these studies but some of the main conclusions can be reiterated.

- The solar protection of the roof remains one of the main points in the thermal design of buildings in tropical climates. We were able to show some faults of the implemented insulation in the experimented projects leading to important overheating. It is also necessary to maintain the specifications of Table 1 concerning the minimum thickness of insulation needed.

- Natural ventilation showed itself effective in the tested flats except at night in the case of very weak night breezes when an overheating effect of 1°C was observed compared to the outside temperature. Also, the ECODOM percentage of openings of 25% is a required minimum.
- Finally, the sociological study showed that the tenants were globally satisfied with their flat as far as the thermal aspects are concerned. However, dissatisfaction resulted from the bad acoustic design of the flats, and one of the major problems of design in tropical climate is the duality of thermal and acoustic design. On the one hand, the dwelling must be kept open for thermal comfort, but on the other hand, acoustic comfort is achieved by closing the windows.

## 5. CONCLUSION

The methodology used for developing ECODOM standards, from simulations to experimental results, has been presented.

The whole study led to a pedagogical reference document defining efficient passive solar cooling strategies and specifications for each component of the dwelling outer framework and likewise minimal porosity ratios to optimize natural ventilation. Dwellings to be constructed according to ECODOM standards should follow these specifications. ECODOM participants (architects, designers, engineers, building physicist, etc.) now speak the same 'language' by using the reference ECODOM document.

A monitoring has been set up for the first ECODOM dwellings constructed in order to experimentally validate the impact of passive cooling specifications on the comfort of occupants. This experimental work has allowed a real scale feedback. Such monitoring is essential, as the ECODOM standard is the first step towards the setting up of building codes and regulations on energy efficiency in the framework of residential buildings in French overseas territories, that should be in operation by the year 2002.

## REFERENCES

- Ashley R. and Reynolds J. S. (1993) Overall and zonal efficiency end use in an energy conscious office building. *Solar Energy* 52(1), 75-83.
- Bansal N. K., Garg S. N. and Kothari S. (1992) Effect of exterior surface color on the thermal performance of buildings. *Build. Environ.* 27, 31-37.

- Célaire R. (1997) *Opération expérimentale ECODOM, cahier de prescriptions*, Document de référence.
- De Waal H. B. (1993) New recommendations for building in tropical climates. *Build. Environ.* 28, 271-285.
- Filippin C., Beascochea A., Esteves A., De Rosa C., Cortegoso L. and Estelrich D. (1998) A passive solar building for ecological research in Argentina: the first two years experience. *Solar Energy* 63(2), 105-115.
- Gandemer J., Barnaud G., Sacre C. and Millet J. R. (1992) In *Méthodologie de prise en compte des paramètres climatiques dans l'habitat et conseils pratiques*, Guide sur la climatisation naturelle en climat tropical humide, Vol. Tome 1, p. 133, C.S.T.B.
- Garde F. (1997) In *Validation et développement d'un modèle thermo-aérodynamique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes*, p. 260, Université de La Réunion, PhD Thesis.
- Garde F., Boyer H. and Gatina J. C. (1999a) Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in French tropical island buildings. *Build. Environ.* 34, 71-83.
- Garde F., Boyer H. and Célaire R. (1999b) Building design in tropical climates. Elaboration of the ECODOM standard in the french overseas 'départements'. In *Proceedings of ISES Solar World Congress, 4-11 July, Jerusalem, Israel*.
- Garg N. K. (1991) Passive solar options for thermal comfort in building envelopes — an assessment. *Solar Energy* 47(6), 437-441.
- Hassid S. (1986) A linear model for passive solar evaluation. *Solar Energy* 37(2), 165-174.
- Malama A. and Sharples S. (1996) Thermal and economic implications of passive cooling strategies in low-cost housing in tropical upland climates. *Architect. Sci. Rev.* 39, 95-105.
- Millet J. R. (1988) Conception thermique des bâtiments en climatisation naturelle dans les D.O.M. In *Document d'application. C.S.T.B no. 88.4343*, p. 124.
- Peuportier B. and Michel J. (1995) Comparative analysis of active and passive solar heating systems with transparent insulation. *Solar Energy* 954(1), 13-18.
- Rousseau P. G. and Mathews E. H. (1996) A new integrated design tool for naturally ventilated buildings. *Energy Build.* 23, 231-236.



# Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in French tropical island buildings

F. Garde\*, H. Boyer, J. C. Gatina

Université de la Réunion, Faculté des Sciences, Laboratoire de Génie industriel, BP7151, 15 avenue René Cassin, 97 715 Saint-Denis Messag Cedex 9, France

Received 28 February 1997; revised 9 July 1997; accepted 22 October 1997

## Abstract

Electric load profiles of tropical islands in developed countries are characterized by morning, midday and evening peaks arising from an all year round high power demand in the commercial and residential sectors, due mostly to air-conditioning appliances and bad thermal conception of the building.

To face this problem, the work presented in this paper has led to the realization of a global quality standard for energy saving and thermal comfort. This quality standard is obtained through optimized bioclimatic urban planning and architectural design, the use of passive cooling architectural components, natural ventilation and energy efficient systems. The methodology consisted of the study of typical dwellings with the use of a thermal and airflow software (CODYRUN). The simulations were carried out on the constituent components (roof, walls, windows) and on natural ventilation, in such a way as to estimate the influence of some technical solutions (insulation, horizontal shading, window dimension etc ...) on each component in terms of thermal comfort and energetic performances.

Throughout 1996, these technical solutions have been implemented in 280 new pilot dwelling projects. © 1998 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

## 1. Demand side management in the thermal design of buildings

There are four French Overseas Territories (DOM): two islands are located in the Caribbean (Martinique and Guadeloupe), one situated 400 km to the east of Madagascar in the Indian Ocean (Reunion Island) and the fourth is in the North of Brazil (French Guiana). All experience a hot climate—tropical and humid in the islands of Guadeloupe, Martinique and Reunion, and equatorial in French Guiana.

Each year 20,000 dwellings are built in the French Overseas Departments. Three quarters of this development is in welfare housing. Initially this new housing was constructed without the comfort of air-conditioning or hot water. This has led to a haphazard installation of instant electrical hot water boilers and badly situated, conceptualised and maintained individual air-conditioning systems. The lack of thermal regulations in combination with the economic constraints of a tight

\* Corresponding author. E-mail: garde@univ-reunion.fr

Domestic electricity

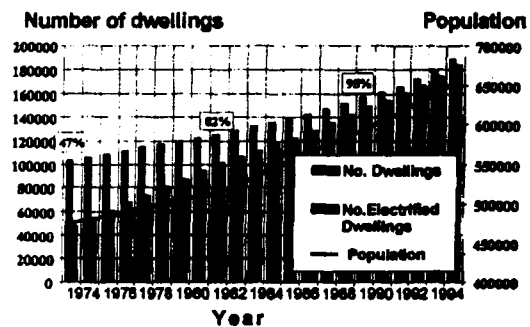


Fig. 1. Growth in number of dwellings — Reunion Island.

construction budget have led to the development of buildings totally unadapted to the tropical climate. The large population increase in the DOM, the rise in living standards, and the decreasing costs of air-conditioning appliances constitute a real problem in the fields of energy, economy and environment.

The above factors result in a high demand for elec-

tricity at peak times (see Figs 2-3), as well as the daily and nightly mismanagement of consumption, which has a direct effect on the size of the electrical production plants and therefore future investments.

In an insular position (such as the case of the DOM), the electrical production is principally that generated by the low efficient burning of fossil fuels which results in high CO and SO<sub>2</sub> emissions. The reduction of electrical production also means a reduction of pollutant emissions.

When considering the economical aspects, the high production cost also generates a continual high deficit for the French Electricity Board (EDF) in the DOM (over 2 thousand million French Francs in 1995), as the average production costs per kWh is greater than the selling price (the selling price being the same as in mainland France).

All these factors lead to the conclusion that demand-side management in thermal design of buildings is of great economical, social and environmental importance.

An overall long term programme to improve comfort and energy performance in residential and commercial buildings is actually underway in the overseas territories. In the new housing sector, a quality standard seal has been launched concerning the building structure, the hot water production systems and the air-conditioning appliances.

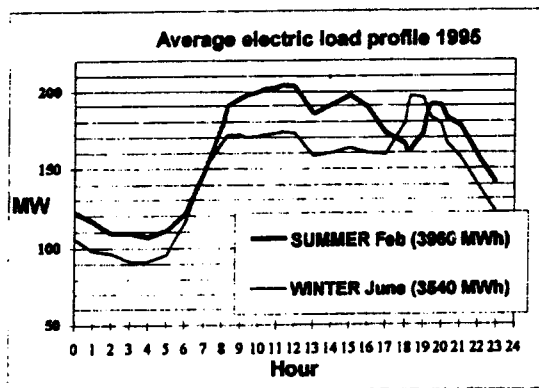


Fig. 2. Daily electric load profile—Reunion Island.

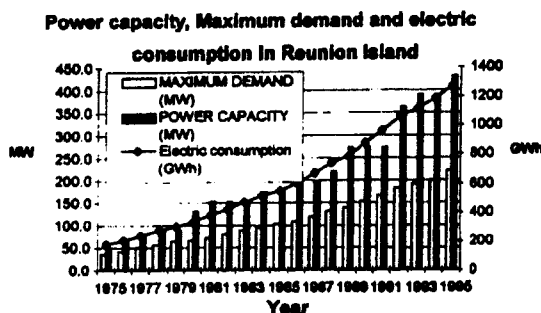


Fig. 3. Annual evolution of power capacity and electric consumption—Reunion Island.

## 2. The ECODOM standard

This DSM pilot initiative was launched in early 1995 in the French islands of Guadeloupe and Reunion through a partnership between the French Electricity Board (EDF), institutions involved in energy saving, environmental conservation (ADEME) and construction quality improvement, the ministries of Housing, Industry and the French Overseas Department, the University of Reunion Island and several other public and private partners, including low cost housing institutions, architects, energy consultants, etc. The objectives initially are to implement the standard to 280 pilot dwelling projects throughout 1996, then, to expand this pilot phase in the residential sector on a much broader scale (2000 new dwellings per year), and to complete similar global energy efficiency projects in existing housing and large and medium size commercial buildings.

### 2.1. The objectives

The ECODOM standard aims to simplify the creation of naturally ventilated comfortable dwellings whilst avoiding the usual necessity of a powered air-cooling system which consumes electricity. ECODOM has both social and economic objectives as it aims to improve thermal quality standards and decrease energy consumption in the housing concerned. The aim of ECODOM is to provide simple technical solutions, at an affordable price, rather than to research the ideal bioclimatic building, which is economically and financially not feasible. Also, the simplicity of the technical solutions provided could enable the setting up of similar projects in countries with comparable climates. There also exists the work of Malama [1], Olusmbo [2] and Ratnaweera [3], who have worked on the design of buildings adapted to a defined climate, in Zambia, Nigeria and Sri Lanka respectively. The work of Mathews for low cost dwellings in South Africa [4] is also very close to the aims of the ECODOM standard.

### 2.2. The recommendations

Comfort level is reached through an architectural building design adapted to the local climate: the dwelling is protected from the negative climatic parameters (the sun) and favours the positive climatic factors (the wind).

The achievement of a good of thermal comfort level requires the application of a certain number of compulsory rules. These recommendations concern the immediate surroundings of the dwelling and its constituent components. They cover five points:

- (1) Position on site (vegetation around the building)
- (2) Solar protection (roof, walls, windows)
- (3) Natural ventilation (exploitation of trade winds, and

optimized ratio of inside/outside air-permeability of the dwelling) or mechanical ventilation (air-fans)

- (4) Domestic hot water production (servo-controlled night electric drum, sized according to requirements, solar or gas water heaters)
- (5) Option, air-conditioned bedrooms (closed room and efficient, regulated appliances).

### 3. Methodology

To reach these quality standards, an important number of simulations were computed on each component of the building in order to quantify the thermal and energetic impact of each technical solution to the thermal comfort within the building. Various authors have already worked on specific problems concerning the outside structure of the building: Bansal [5] on the effect of external colour, Malama [1] on passive cooling strategies for roof and walls, Rousseau [6] on the effect of natural ventilation and De Walls [7] for global considerations on the building adapted for a defined climate.

Our approach consisted of the study of typical dwellings, with the use of a building thermal and airflow simulation software. The simulations were carried out on the constituent components (roof, walls, windows) and natural ventilation, in such a way as to estimate the influence of each of the above recommendations, in terms of thermal comfort and energetic performances. The analysis and synthesis of the results of these simulations have been presented in a research document [8], available from the authors. The following paper illustrates the adopted methodology, presents the results obtained concerning natural ventilation and a synthesis of the results for the overall standard recommendations.

#### 3.1. The computer program

The software CODYRUN used for our simulations has already been covered in various publications [9–12]. The multiple model aspect is detailed in Ref. [10], the thermal model in [11] and the data structuration and the description of the front-end in [12]. One of the advantages of CODYRUN is that the software is an efficient building thermal simulation tool, which includes research and design aspects, and takes into consideration different types of climate. More precisely, it is a multizone software integrating both natural ventilation and moisture transfers. The choice of the software is thus justified by the fact that in a humid tropical climate, the building is an open system where the airflow transfer exchanges are very important and the climatic concerns are variable. CODYRUN precisely matches these objectives as it was designed for that purpose. The computer program has been validated through experiments carried out on real pilot sites, in a humid tropical climate [13].

When considering the thermal behaviour of a building, its thermal state is determined by the continuous field of temperatures, at all points included within the physical limits of the building. The constitution of a reduced model, with a finite number of temperatures, is possible by assuming some simplifications (monodimensional heat conduction, well mixed volumes, linearized superficial exchanges, etc.).

Each step of the calculation program of the software executes the recognition of airflow patterns, temperature field and specific humidity of each zone.

Based on the nodal analysis, the thermal model relies on a previous simulation code, CODYBA [14], and is the main part of the software. With the usual physical assumptions, the technique of nodal discretisation of the space variable by finite difference is used. In addition, the mass of air inside one zone is represented by a single thermal capacity. Thus, for a given zone, the principle of energy conservation applied to each concerned wall-node, associated with the sensible balance of the air volume, constitute a set of equations, that can be condensed in a matricial form.

$$[C] \frac{dT}{dt} = [A] \cdot T + B \quad (1)$$

At each step, the resolution of eqn (1) uses an implicit finite difference procedure and the coupling iterations between the different zones make it possible to calculate the evolution of temperatures, as well as those of sensible powers needed in case of air-conditioning. The zone coupling approach of CODYRUN is similar to the one used in ESP [15]. The most simplified airflow model considers, as known, the airflow rates between all zones. The more detailed model is an airflow pressure model which takes into account the driving effects of the wind and the thermal buoyancy. The problem of large openings in this pressure model is solved with the use of the Walton model. In comparison with other programs, it can be seen that the airflow pressure model, integrating large openings, is similar to TARP [16]. The building is also represented as a network of pressure nodes, connected by non-linear equations giving the flows as a function of

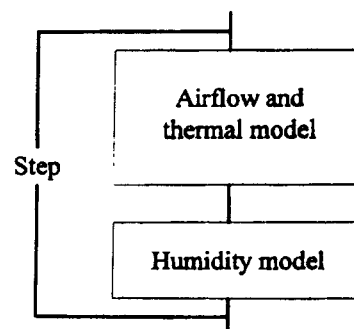


Fig. 4. General flowchart.



the pressure difference. This detailed airflow calculation goes through the iterative solution of the system of non-linear equations made up with the air mass conservation inside each zone. The flows involved in this model are coupled with the thermal system, which enables simultaneous consideration of all the different thermal transfers.

The humidity model leads to a system of equations similar to the thermal model but does not take into account the humidity transfers in the partitions and the furniture.

### 3.2. Definition of a typical day

Reunion Island is situated at a latitude of 21° South and a longitude of 55° East. The climate is humid tropical. There is a dry season (May to October)—mainly cold and dry, predominated by the trade winds, and a wet season (November to April)—hotter and more humid with light winds from differing directions. The island is also influenced by the passage of cyclones.

The relief splits the island in half:

- The windward zone, exposed to trade winds, characterised by heavy rainfall and an average temperature of 23°C.
- The leeward zone, generally sunny and dry. This region has much less rainfall and the average temperature is 2–3°C higher than the above zone.

The study of the effects on a building from outside conditions, necessitates the availability of certain meteorological information, representative of the studied site. In order to reduce the calculation time, our simulations were carried out over one day only. The day had to be that which was most representative of the conditions of the wet season. It is in that period that the most unfavourable combination of parameters are found.

The day which most closely represented the average temperature and solar radiation conditions observed on site was selected. Also, in order to optimise the radiative gain of direct solar radiations, conditions with low cloud covering were chosen (see Fig. 5).

The choice of a site for the selected meteorological sequence was the weather station at Gillot, situated in the North East of the island, near to Saint-Denis. It is a highly populated urban zone. The site is representative of a humid coast line, at least during the wet season, when the trade winds are not blowing. Table 1 gives the values found for each parameter for the given site.

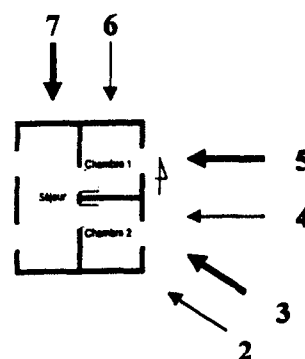
#### 3.2.1. Wind

When considering the wind speed and wind direction, our aim was to simulate the thermal behaviour of the dwelling during the warm humid season, which is a period where the trade winds do not occur. Reunion Island is influenced by the phenomena of land-sea heating and

cooling effects, creating thermal winds (onshore during the day, offshore during the night). Following the consultation of the meteorological figures in our possession, it was found that a night breeze with a speed of 1 ms<sup>-1</sup>, represented 20% of the distribution in frequency and that its direction was perpendicular to the coast line at night.

We also created an artificial wind file, consisting of seven consecutive days experiencing the same external temperature, relative humidity and solar radiation characteristics (identical to the typical day), but with different wind speeds and wind directions. We considered the case of days with a light wind ( $v = 1 \text{ ms}^{-1}$ ), and days with a moderate wind ( $v = 5 \text{ ms}^{-1}$ ) from variable directions. This way it was possible to assess the airflow performances of the dwellings in different wind situations:

- Day 1: no wind;
- Day 2: light wind (1 ms<sup>-1</sup>), South East;
- Day 3: moderate wind (5 ms<sup>-1</sup>), South East;
- Day 4: light wind, East;
- Day 5: moderate wind, East;
- Day 6: light wind, North;
- Day 7: moderate wind, North.



### 3.3. Description of a typical dwelling

The typical dwelling chosen is that which is most representative of the type of accommodation built in Reunion Island, in terms of architecture and building materials. We have selected two typical dwellings which conform to the plans in Fig. 6, but differ on a level of thermal inertia (one is a light structure, the other a heavy structure) and a dwelling in block of flats. These dwellings constitute the references for the simulations. Table 2 summarizes all the components of each dwelling.

#### 3.3.1. The typical individual dwelling

This dwelling is composed of three bedrooms, a living-room, a bathroom and a kitchen. Only the living zones of the house, bedrooms 1 and 2 and the living-room were considered for the simulations because the standard concentrates exclusively on the improvement of the living areas. When taking into account the number of aspects

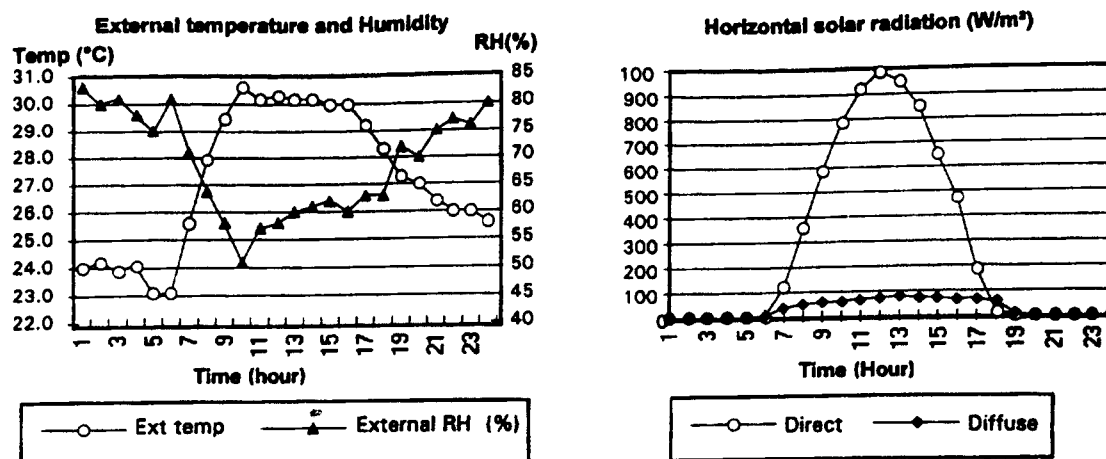


Fig. 5. Typical day used in the simulations.

Table 1  
Meteorological criteria used for the typical day

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Daily direct solar radiation             | from 5700–7400 Whm <sup>-2</sup> |
| Daily diffusive solar radiation          | from 500–1000 Whm <sup>-2</sup>  |
| Average maximum temperature — Hot season | 30°C                             |
| Average minimum temperature — Hot season | 22°C                             |

covered, we have tried to optimise the number of zones, that is why a three roomed building (Fig. 7) seemed the most obvious choice in order to highlight the different thermal, airflow, influence of orientations phenomena etc. The glazed surfaces in the rooms represent 11% of the total surface, and in the living room 22%. The bedroom surfaces are 11 m<sup>2</sup> with a volume of 30 m<sup>3</sup>, the living-room surface is 22 m<sup>2</sup> with a volume of 60 m<sup>3</sup>.

### 3.3.2. Flats

After consulting the local low cost housing institutions and the new housing statistics for Reunion Island, it was found that the most common dwelling found is the T3/V, which consist of two bedrooms, a living-room and a veranda (see Fig. 8). The simulations were carried out on three types of dwelling (one beneath the roof, one between two stairs, and the last one on the side of the building), which are part of the building elements classification of De Waal [7] (see Fig. 9). For the simulations, the typical flat was assumed to be a two zone building with a day zone (living-room) and a night-zone (bedroom).

### 3.4. Comparison criteria

To compare the different technical solutions, the thermal comfort aspect as well as the energetic aspect were taken into account.

Table 2  
Description of typical dwellings

| Typical dwelling                | Materials                             | Thermal resistance (m <sup>2</sup> K/W) | External Absorbtivity $\alpha$ |
|---------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| <i>Light structure dwelling</i> |                                       |   |                                |
| Roof                            | iron sheet/airspace (10 cm)           | 0.22                                    | 0.7                            |
| External walls                  | wood boards with air space (5 cm)     | 0.5                                     | 0.7                            |
| Internal walls                  | wood boards with air space            | 0.5                                     | –                              |
| <i>Heavy structure dwelling</i> |                                       |   |                                |
| Roof                            | concrete (16 cm)                      | 0.1                                     | 0.7                            |
| External walls                  | hollow concrete blocks (20 cm)        | 0.25                                    | 0.7                            |
| Internal walls                  | hollow concrete blocks (20 cm)        | 0.1                                     | –                              |
| <i>Flat</i>                     |                                       |   |                                |
| Roof                            | concrete (16 cm)                      | 0.1                                     | 0.7                            |
| External walls                  | concrete (20 cm)                      | 0.11                                    | 0.7                            |
| Internal walls                  | plasterboard (with an airgap of 5 cm) | 0.2                                     | –                              |

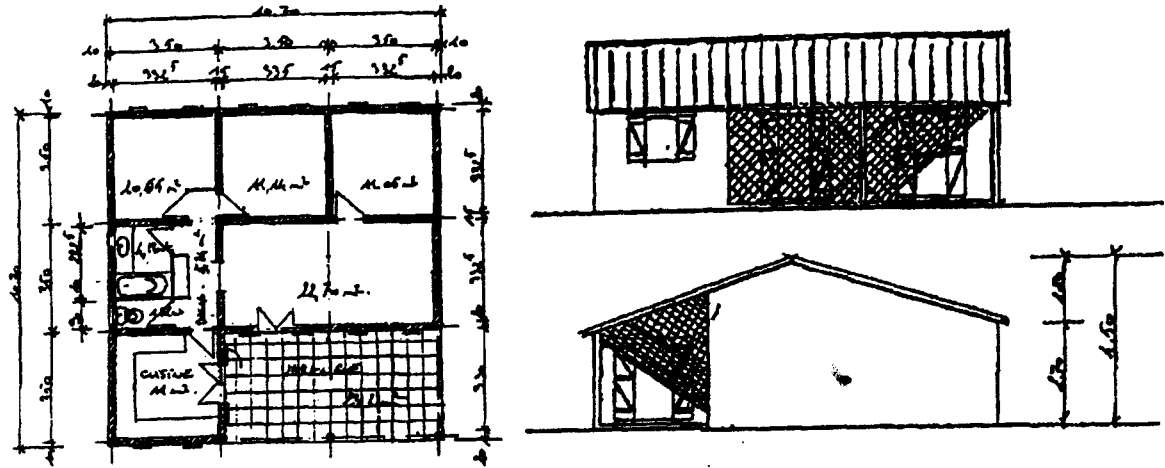


Fig. 6. Plans of the typical individual dwelling.

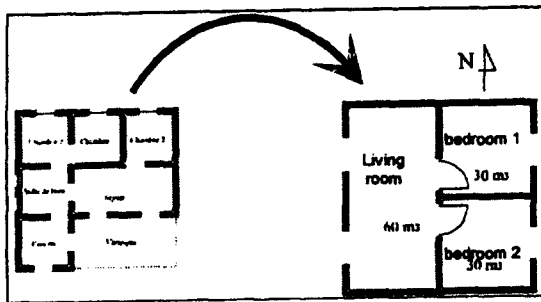


Fig. 7. Typical layout for the simulations.

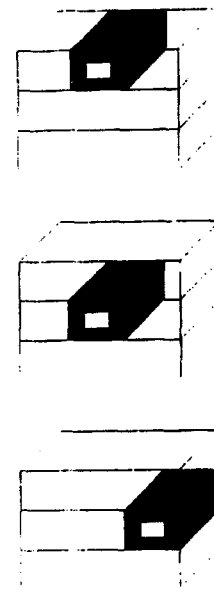


Fig. 9. Case studies.

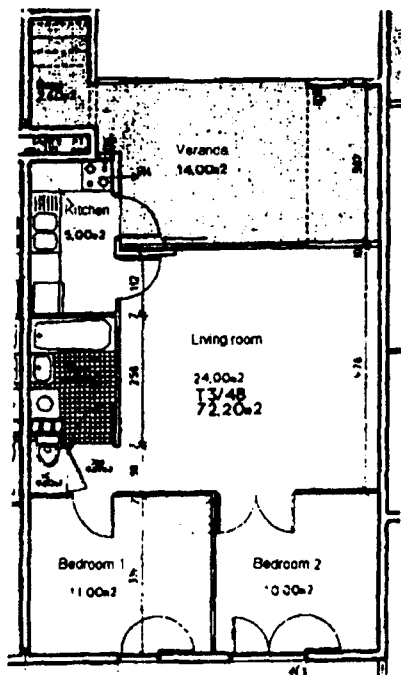


Fig. 8. Typical flat.

3.4.1. Comfort criterion

The chosen comfort parameter was the resultant temperature. This variable enabled us to take into account the non-comfort arising from the long wave radiative effects;

$$T_{res} = 0,55.T_a + 0,45.T_r \tag{2}$$

where  $T_a$  = indoor air temperature (°C),  $T_r$  = mean radiant temperature:

$$T_r = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot T_{si}}{\sum_{i=1}^n S_i} \tag{3}$$

where  $T_{si}$  is the indoor surface temperature for zone  $i$ , and  $S_i$  the  $i$  component surface.

We followed the evolution of this variable throughout the typical day, but average day and night temperatures were used, characterizing the day and night uses of the dwelling.

- Resultant day temperature = average resultant temperature from 07:00–19:00 h;
- Resultant night temperature = average resultant temperature from 20:00–06:00 h;
- Maximum resultant temperature.

### 3.4.2. Energetic criterion

Another important criterion is the energetic one. We have used this criterion to measure power and energy improvements brought about by the technical solutions. The parameters used in the simulations were:

- maximum power (W);
- maximum power per square metre ( $W/m^2$ );
- total daily thermal energy (thermal kWh);
- overall thermal energy during the wet season (thermal kWh).

The power observations were carried out on the basis of an infinite power air-conditioning system keeping each room temperature at  $25^\circ\text{C}$ . This method thus enabled us to obtain results in energy consumption and in thermal power reduction. Air-conditioning in tropical climates uses  $25^\circ\text{C}$  as the most commonly set temperature.

## 3.5. The simulation strategy

### 3.5.1. The components

As far as outer protecting structures are concerned (i.e. roof, walls, windows), a temperature and power study was carried out for each dwelling and each component part thereof. During the simulations, the building is closed and has no air renewal. Only the thermal performance aspect is taken into consideration. This initial phase enables the best technical solutions to be obtained. For example, when considering an opaque separation, is a solar protection of  $d/h = 0.25, 0.50, 0.75$  or  $1$  required ( $d =$  dimension of the over-hang and  $h =$  height of the wall); or is insulation more efficient? We have therefore tested different roof colours with differing insulation thicknesses varying from 0–10 cm, different opaque separation colours with a solar protection in the form of an over-hang varying from  $d/h = 0$  to  $d/h = 1$ , or thermal insulation in which the thickness varies from 0–4 cm. As regards the solar protection for the glazing, different dimensions of horizontal external sunshade and venetian blinds were compared.

Natural ventilation is a unique case as the improvements may only be judged on the temperature reached. The problem posed was to measure the impact of external and internal permeability on the internal resulting tem-

perature. In brief, what percentage of facade openings is necessary for the improvement of thermal comfort, and does the interior lay out have any influence on this? The bioclimatic perfectionists cite percentages of 40%, which are too high to be economically feasible [17]. We have varied the interior and exterior permeability rates of typical dwellings from 15–40% and have simulated all possible combinations.

### 3.5.2. Air conditioned room option

We presuppose that one of the rooms is air-conditioned, with a cold production period from 20:00–06:00 h. The internal gains are constituted by four people (2 adults and 2 children), and by lighting in each room. The Table 3 summarizes the internal charges.

The simulations were carried out on a dwelling with a bad thermal structure, an important air renewal rate (5 vol/h) and a set temperature of  $26^\circ\text{C}$  and  $22^\circ\text{C}$  and a dwelling with good solar protection, a controlled air renewal rate of 1 vol/h and a set temperature of  $26^\circ\text{C}$ .

## 3.6. Real case

With all the technical solutions of each component of the outer structure conformed to, in a second phase, we compared the existing dwelling which is on overall badly designed (bad solar protection, insufficient ventilation, etc . . .), to a well designed dwelling adhering to the technical solutions that had been found during the first phase.

## 4. Results

### 4.1. Location on site

Performant thermal and energetic housing design starts initially at the location on the building site. The immediate surroundings of a building have a significant influence on the conditions of thermal comfort inside. This is particularly the case for the surrounding surface of the building, which should neither reflect the solar radiations towards the house nor increase the ambient air temperature.

Table 3  
Internal charges summary table — individual dwelling

| Internal loads       | Power (W) | Power (W) |
|----------------------|-----------|-----------|
| Adult                | 60        | 60        |
| Child                | 40        | 40        |
| Lighting Room 1      | 100       | 0         |
| Lighting Room 2      | 100       | 0         |
| Lighting Living room | 300       | 0         |

#### 4.1.1. The results concerning the surroundings

The finished surface around the building should be protected from direct sunlight for more than three quarters of its perimeter, at a width of at least 3 m. This can be achieved by either vegetation (lawn, bushes, flowers) around the building, or by all vegetation sun-blocks. These recommendations are similar to those of De Wall [7] concerning urban planning for warm humid climates.

#### 4.2. Solar protection

In a humid tropical climate, the source of discomfort arises from a temperature increase due to bad architectural design, when concerning insulation. Solar radiation accounts for 80% with the remaining due to conduction exchanges. The setting up of efficient solar protection constitutes the second fundamental phase in the thermal design of buildings. This protection concerns all the exterior separations of the dwelling: roof, walls and windows.

##### 4.2.1. Solar protection of the roof

Thermal inflow represent up to 60% of the overall inflows from the separations in the dwellings. Efficient solar protection for the roof is therefore of prime importance for good thermal design.

The following table is valid for terraced roofs, inclined roofs without lofts and roofs with closed or barely ventilated lofts.

Well ventilated lofts should have ventilation ducts spread out uniformly throughout the perimeter, which surface conforms to the following inequation:

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{\text{Total area of openings}}{\text{Roof area}} \geq 0.15 \quad (4)$$

In this case, the ceiling under the loft should satisfy certain recommendations (see Table 4).

Table 4  
Roof solar protection

| <i>Insulated simple roofs</i>           |   |  |
|---|---|--|
| Roof colour                             | Polystyrene type insulation<br>$\lambda = 0.041 \text{ W/mK}$ | Polyurethane type insulation<br>$\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ |
| Light ( $\alpha = 0.4$ )                | 5 cm  | 4 cm   |
| Medium ( $\alpha = 0.6$ )               | 8 cm  | 6 cm   |
| Dark ( $\alpha = 0.8$ )                 | 10 cm   | 8 cm   |
| <i>Roofs with well-ventilated lofts</i> |   |  |
| Roof colour                             | Polystyrene type insulation<br>$\lambda = 0.041 \text{ W/mK}$ | Polyurethane type insulation<br>$\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ |
| Light ( $\alpha = 0.4$ )                | No insulation needed  |  |
| Medium ( $\alpha = 0.6$ )               | 2 cm  | 1 cm   |

The use of a light colour is generally the only way in which we are able to lower the inside temperature of the dwelling by 3°C. Equally, insulation adds a supplementary decrease of 3°C. The avoided thermal power is 150 W/m<sup>2</sup> of protected area, and the avoided thermal energy is equal to 250 kWh/m<sup>2</sup> for the whole of the wet season.

It is possible to use thermal insulation barriers such as aluminium foil-coated products [18]. They must be installed in attics, with an adjacent airgap. The aluminium foil reflects radiant heat like a mirror, whilst the polished aluminium emits little of the radiant heat that falls on it. This type of protection is very efficient in climates with high levels of sunshine.

Table 4 only gives results for polystyrene and polyurethane, as these kinds of insulation are the most commonly used at an affordable price under tropical climates. Other alternatives exist and can be used if their equivalent thermal resistance is sufficient compared to the results given in Table 4.

##### 4.2.2. Solar protection of walls

The thermal gains from the walls represents 20–30% (40–65% for the flats which are not under the roof) of the thermal gains from the separations. Various solutions enable a protection of the walls from the sunlight: horizontal/vertical canopy or overhang, thermal insulation of the walls, and vertical shading. The results obtained from the simulations constitute Table 5, which gives the optimum dimensions of the canopy in relation to the orientation of the walls and the walls inertia.

For the walls with no canopy, the minimum insulation thicknesses (in cm) needed for the different types of walls and in different orientations are shown in Table 6.

If the values of  $d/h$  seem excessive, other alternatives such as vertical shading with an airgap may be considered. In that case, no recommendations are needed for each orientation of the wall. Meanwhile, these values are fully compatible with the creole architecture components such as veranda and balcony which insure an efficient solar protection of walls and windows.

These solutions lead to a reduction in the resulting interior temperature of 0.5°C (heavy structure) to 1°C (light structure). They enable a reduction of the entering thermal flows of 40 W/m<sup>2</sup> of protected area, corresponding to an avoided thermal energy of 65 kWh/m<sup>2</sup> for a light structure. For a heavy structure, the reduction of entering flow is 15 W/m<sup>2</sup> and the avoided thermal energy is 25 kWh/m<sup>2</sup>.

##### 4.2.3. Solar protection of windows

The protection of the windows is fundamental, not only because they represent 15–30% of the thermal gains, but also because they contribute to the increase in the discomfort experienced by the occupant, due to the instant heating of the ambient air temperature and

Table 5  
Overhang of canopy — minimum  $d/h$  ratio values to be respected

| Type of wall   | light colour |       |      |       | medium colour |       |      |       |
|--|--------------|-------|------|-------|---------------|-------|------|-------|
|  | East         | South | West | North | East          | South | West | North |
| concrete 20 cm ( $R = 0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )         | 0.4          | 0.2   | 0.7  | 0.5   | 1             | 0.5   | 1.3  | 0.7   |
| hollow concrete blocks ( $R = 0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ) | 0.1          | 0.3   | 0.2  | 0.5   | 0.5           | 0.3   | 0.8  | 0.5   |
| wood ( $R = 0.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )                   | 0            | 0     | 0    | 0     | 0             | 0     | 0.2  | 0.1   |

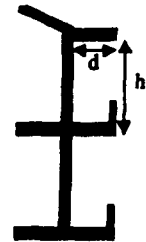


Table 6  
Insulation of walls (in cm) for different orientations and external colours (for a conductivity of 0.041 W/mK)

| Type of wall   | light colour |       |      |       | medium colour |       |      |       |
|--|--------------|-------|------|-------|---------------|-------|------|-------|
|  | East         | South | West | North | East          | South | West | North |
| concrete 20 cm ( $R = 0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )         | 1            | 1     | 1    | 1     | 2             | 1     | 2    | 2     |
| hollow concrete blocks ( $R = 0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ) | 1            | 1     | 1    | 1     | 1             | 1     | 2    | 2     |
| wood ( $R = 0.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ )                   | 0            | 0     | 0    | 0     | 0             | 0     | 1    | 1     |

exposure to direct or reflected sunlight. All the windows must therefore be protected by some sort of window shading, such as horizontal canopies and other shading devices such as venetian blinds or opaque, mobile strips.

The simulations enable us to optimize the geometric characteristics of the horizontal canopies in relation to the orientation of the glazing (see Table 7).

These solutions lead to a reduction in the interior temperature of more than 4°C for a light structure and 2°C for a heavy structure. They enable the reduction of the thermal flows of 120 W/m<sup>2</sup> of protected window for a light structure, corresponding to an avoided thermal energy of 130 kWh/m<sup>2</sup>. The reduction of the thermal flow for a heavy structure is 100 W/m<sup>2</sup> and the avoided thermal energy is 100 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 4.3. Natural ventilation

In warm climates, natural ventilation is the most usual means of heat transfer from both occupants and buildings [18].

Depending on its importance, the natural ventilation ensures three functions [7, 17]:

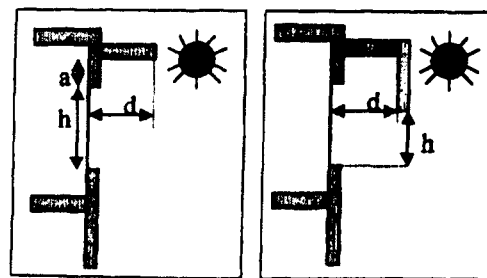
- *Weak flow* (1 to 2 vol/h) for the preservation of hygiene conditions by air renewal;
- *Moderate flow* (40 vol/h), for the evacuation of internal gains and the cooling of the outside structure;
- *High flow* (more than 100 vol/h) to assure the comfort by sudation.

Thus the high air speed and its good layout better the sudation process. This is the only means which enables the compensation of the high temperatures, coupled to a high rate of hygrometry.

Our aim is therefore to find the exterior/interior permeability coupling which enables us to obtain the rate of air renewal of 40 vol/h. On the one hand the structure of the dwelling will be sufficiently cooled and on the other, such an air renewal rate allows us to hope for wind speeds of 0.2–0.5 ms<sup>-1</sup>, which is largely sufficient, when taking into account the climatic parameters (outside tem-

Table 7  
Values of  $d/(2a+h)$  (case 1), or  $d/h$  (case 2)

|                | Orientation of windows |       |      |       |
|----------------|------------------------|-------|------|-------|
|                | East                   | South | West | North |
| Reunion Island | 0.8                    | 0.3   | 1    | 0.6   |



case 1

case 2

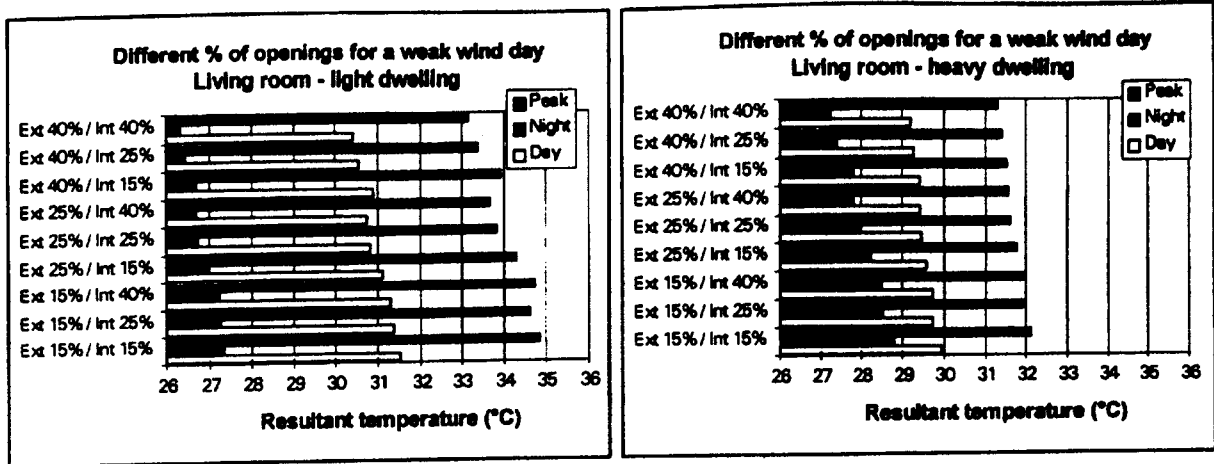


Fig. 10. Influence of % of openings for a light structure for a light and heavy dwelling.

perature rarely greater than 32°C), to assure a good level of comfort.

We found from the simulations that the critical air renewal rate of 40 vol/h is obtained for a configuration of exterior permeability equal to 25% and interior permeability of 25%, equally for a light structure and for a heavy structure. The natural ventilation is simply more effective during the night for the heavy structure, whereas for the light structure it serves mainly to evacuate the overheating from during the day (see Fig. 10).

Thus the dwelling should have complete cross ventilation (see Fig. 11). At each level or floor, there should exist openings in the principal rooms, on at least two opposing facades (the principal rooms being the bedroom and the living-room). Also the interior lay-out should be designed in such a way that the outside air flows through the principal rooms and the corridors, from one facade to the other, by the doors and the other openings in the partitions.

$$P1 = \frac{Sol}{Sp} \geq 0.25 \quad P2 = \frac{Ao}{Sp} \geq 0.25$$

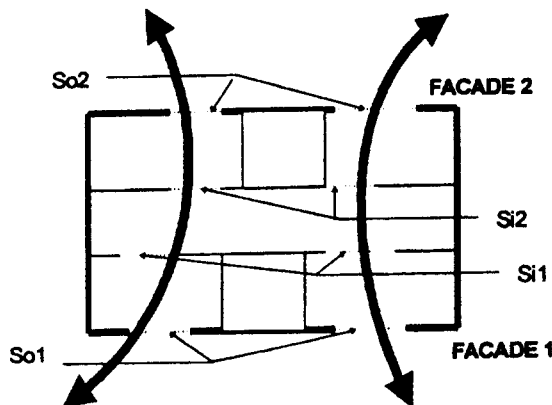


Fig. 11. Cross ventilated dwelling.

$$Sp = \frac{Sp1 + Sp2}{2}$$

$$Si1 \geq Sol \text{ or } So2$$

$$Si2 \geq Sol \text{ or } So2$$

Sol: Net surface openings, principal rooms (façade 1);

So2: Net surface openings, principal rooms (façade 2);

Sp1, Sp2: Total surface of principal rooms of façades 1 and 2.

Figure 11 gives the details of the calculations needed to determine the exterior and interior permeabilities of 25%.

#### 4.3.1. Fans

When natural ventilation air speed is insufficient, fans can be used in addition. This enables an increase in the comfort range of more than 2°C [19]. Each room in the dwelling should be equipped with electric wiring in the ceiling, wired to a wall switch, destined exclusively for the installation of air fans.

#### 4.4. Air-conditioned bedroom option

In certain dwellings, and at certain times of the year, natural ventilation, even with the existence of fans, is not adequate to attain an acceptable level of comfort. In this case, we can choose to air-condition the bedrooms using efficient appliances. The simulations carried out show that the air-conditioning charges can be reduced through good structure design and control of the air renewal rate. For a light structure, these savings reach 3.4 cooling kWh per day, and 11 kWh for a heavy structure, where the inertia plays a dominating role in the air-conditioners consumption. Throughout the whole of the wet season, the consumption was diminished by half where a good

structure design existed (1000 cooling kWh). The maximum cooling power is therefore 80 W/m<sup>2</sup>.

Practically, the air-conditioners should meet certain standards of efficiency (cooling efficiency of 2.5 for the window units and 3 for split-systems), of permeability (each room should be equipped with a mechanically controlled air renewal of 25 m<sup>3</sup>/h) and must have a maintenance contract.

4.5. Domestic hot water

We have not carried out simulations in this domain. However a certain number of recommendations need to be verified, and we feel that they need to be specified, as water heating consumes a large amount of energy and constitutes a real problem (see part one). It is important that the dwellings are equipped with efficient long-lasting and economic, domestic hot water heating systems. The water heater can be solar, electric or gas.

In the case of solar water heaters, the apparatus must conform to the technical control CSTB. The total minimum surface of the solar panels, should be installed in relation to the size of the dwelling (see Table 8). The capacity of the water storage should be 60-120 l/m<sup>2</sup> per net m<sup>2</sup> of panel. The conventional minimum annual production should be 700 kWh per net m<sup>2</sup> of the capturing surface.

When considering electrical heaters, the appliance must have the mark of the approved French standard of manufacture NF (Norme Française). The instant hot water heaters are high energy consuming, so therefore are excluded. The capacity of the water heater and its cooling constant are calculated in relation to the number of principal rooms within the dwelling (see Table 9). The power supply should be equipped with a three position commutation switch: servo-controlled to the off peak-/over-ride/off.

The gas water heaters must have the French Standard Mark and also provision must be made for a gas flue.

4.6. Case study

In this part of the paper a basic, badly designed dwelling was compared with a dwelling which adheres to the

Table 8  
Technical characteristics — solar water heaters

| Solar water heaters minimum captor surface installed for each dwelling |                    |
|--|--------------------|
| F1-F2  | 1.5 m <sup>2</sup> |
| F3   | 2.0 m <sup>2</sup> |
| F4   | 2.5 m <sup>2</sup> |
| F5   | 3.0 m <sup>2</sup> |
| F6 and more  | 3.5 m <sup>2</sup> |

Table 9  
Technical characteristics of electric water heaters

| Individual electric water heater |                          |                  |
|----------------------------------|--------------------------|------------------|
| Type of dwelling                 | Minimum storage capacity | Cooling constant |
| F1-F2                            | 100 l.                   | 0.32             |
| F3                               | 150 l.                   | 0.23             |
| F4                               | 250 l.                   | 0.22             |
| F5                               | 250 l.                   | 0.22             |
| F6 and more                      | 300 l.                   | 0.22             |

recommendations of the Standard in terms of solar protection and natural ventilation. Even if such a badly designed building is not realistic, the comparisons allow us to quantify the change in comfort due to each passive cooling strategy. Figures 12-15 show the comfort gains in the living-room area for an individual light structure

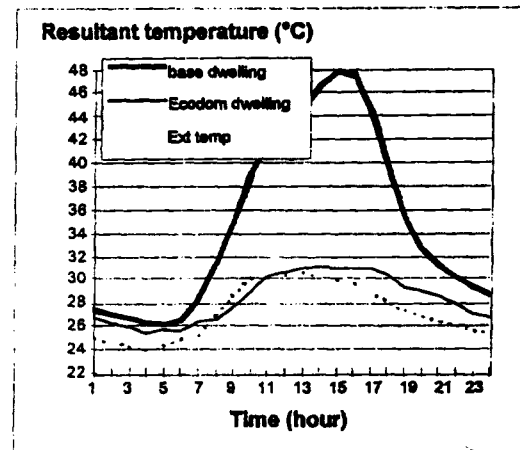


Fig. 12. Case study — light structure.

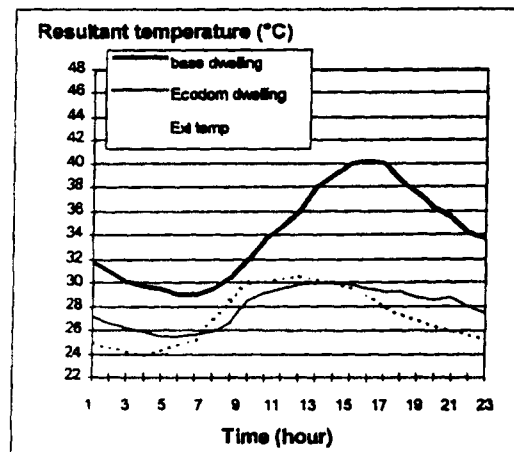


Fig. 13. Case study — heavy structure.



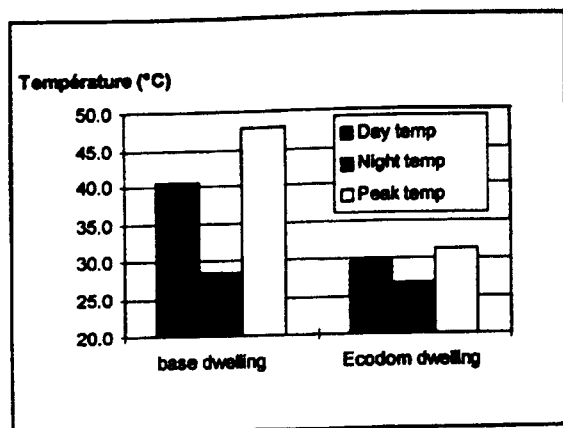


Fig. 14. Comfort gains—light structure.

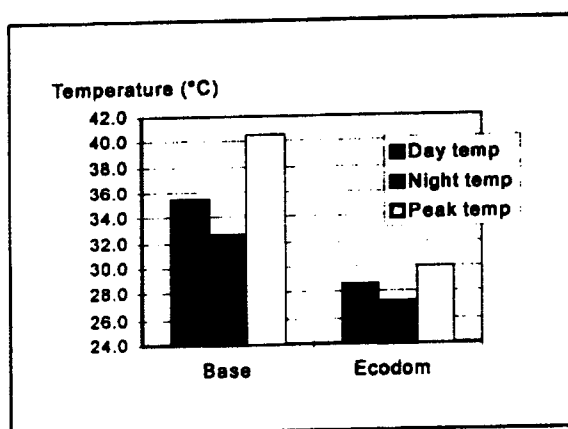


Fig. 15. Comfort gains—heavy structure.

and a heavy structure. Where good thermal design exists, the resulting inside temperature of the dwelling remains inferior to the outside temperature for a heavy structure, and remains no more than 0.5°C for a light structure.

Evidence also shows that each technical solution improves the interior comfort (see Table 10). It was found that more than 70% of the comfort improvement comes directly from the solar protection of the roof and the

Table 10  
Percentage change in comfort due to each passive cooling strategy

|                        | Solar protection of roof | Natural ventilation | Solar protection of walls | Solar protection of windows |
|------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| <i>Light structure</i> |                          |                     |                           |                             |
| Day                    | 46                       | 29                  | 15                        | 10                          |
| Night                  | 0                        | 66                  | 16                        | 18                          |
| <i>Heavy structure</i> |                          |                     |                           |                             |
| Day                    | 38                       | 38                  | 10                        | 14                          |
| Night                  | 19                       | 56                  | 12                        | 13                          |

natural ventilation, therefore these are the essential components of comfort improvement.

## 5. Conclusion

The simulations carried out have led to the definition of performant passive technical solutions for each part of the structure and likewise a minimum ratio to optimise the natural ventilation. The dwellings to be constructed following ECODOM specifications should satisfy the criteria of these technical solutions.

A techno-economical study was launched to evaluate the excess cost of materials. In an overall operation, the excess cost is not greater than 10,000 French Francs (1500 EURO). The aim is therefore to provide the owner with an incentive by means of a subsidy of approximately 6000 FF (1000 EURO) per standardized dwelling.

The objective, in terms of number of dwellings, is in the order of 6000 dwellings within three years. The total energy gain evaluated is 6 MW and 23 GWh electric (5100 TeP). There will be important repercussions on the environment as 23 GWh of electricity economized represents, at first approach, a reduction in emissions of 5000 T of CO<sub>2</sub>.

An experimental follow up of the dwellings will be launched for the first ECODOM operations, in order to validate experimentally the impact of the passive cooling solutions on the comfort of the occupants. This follow up is important, as the setting up of The ECODOM Standard will be the first step towards the setting up of thermal regulations in the French Overseas Territories, by the year 2000.

## Acknowledgements

The financial contribution of the French electricity board *Electricité de France* to this study is gratefully acknowledged.

## References

- [1] Malama A, Sharples S. Thermal and Economic Implications of Passive Cooling Strategies in Low-Cost Housing in Tropical Upland Climates. *Architectural Science Review* 1996;39:95-105.
- [2] Olusmbo Ogunsole O. Computer Assessment of Architectural Design. *Habitat International* 1992;16:25-40.
- [3] Ratnaweera C, Hestnes AG. Enhanced cooling in typical Sri Lankan dwellings. *Energy and Buildings* 1996;23:183-90.
- [4] Mathews EH, Van Wyh SL. Energy efficiency of formal low-cost-housing in South Africa's Gauteng region. *Energy and Buildings* 1996;24:117-23.
- [5] Bansal NK, Garg SN, Kothari S. Effect of Exterior Surface Color on the Thermal Performance of Buildings. *Building and Environment* 1992;27:31-7.

- [6] Rousseau PG, Mathews EH. A new integrated design tool for naturally ventilated buildings. *Energy and building* 1996;23:231-6.
- [7] De Wall HB. New Recommendations for Building in Tropical Climates. *Building and Environment* 1993;28:271-85.
- [8] Garde F, Boyer H, Adelard L, Gatina JC. Rapport Label Ecodom. Validation des prescriptions du document du label. Application à des logements types à l'île de la Réunion. Convention EDF-Université de la Réunion 1996.
- [9] Boyer H. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France 1993.
- [10] Boyer H, Brau J, Gatina JC. Multiple model software for airflow and thermal building simulation. A case study under tropical humid climate, in Réunion Island. In *Proceedings of Building Simulation '93*, ed. AE Delsante, JW Mitchell, RC Van de Perre. IBPSA, Adelaide 1993;pp.111-7.
- [11] Boyer H, Chabriat JP, Grondin-Perez B, Tourrand C, Brau J. Thermal Building Simulation and Computer Generation of Nodal Models. *Building and Environment* 1996;31:207-14.
- [12] Boyer H, Gatina JC, Pignolet F, Brau J. Modelisation methods and data structuration induced for building thermal simulation codes. In *Proceedings of Conference of International Simulation Societies*, Zurich, Switzerland 1994;-729-33.
- [13] Garde F, Boyer H, Brau J, Gatina JC. Validation expérimentale d'un code de modélisation thermique de bâtiments (CODYRUN). Une application en climat tropical humide. In *Proceedings of 2ème colloque interuniversitaire franco-québécois, Thermique des systèmes à température modérée* Sherbrooke, Montréal, Canada 1995;pp.197-202.
- [14] Brau J, Roux JJ, Depecker P, Croizer J, Gaignou J, Finas R. Micro-informatique et comportement thermique des bâtiments en régime dynamique. *Génie Climatique* 1987;11:15-23.
- [15] Clarke JA. *Energy Simulation in Building Design*. Adam Hilger, Bristol 1985.
- [16] Walton GN. A computer algorithm for predicting infiltration and interroom airflows. *ASHRAE Transactions* 1994;90(1):601-10.
- [17] Abdessalam M, Campana D. Guide de la conception climatique du bâtiment en climat tropical humide, Application à la Nouvelle Calédonie. Rapport AFME 1988.
- [18] Centre for Renewable Energy Sources. *Natural and Low Energy Cooling in Buildings*. Report by order of The European Commission Directorate General XVII for Energy 1994.
- [19] Mallick Fuad H. Thermal comfort and building design in the tropical climates. *Energy and Buildings* 1996;23:161-7.

## A validation methodology aid for improving a thermal building model: case of diffuse radiation accounting in a tropical climate

A.J.P. Lauret\*, T.A. Mara, H. Boyer, L. Adelard, F. Garde

Laboratoire de Génie Industriel, Université de La Réunion, Equipe Génie Civil, BP 7151 15 avenue René Cassin, 97705 Saint-Denis Cedex, Ile de la Réunion, France.

Received 20 October 2000; accepted 25 November 2000

### Abstract

As part of our efforts to complete the software CODYRUN validation, we chose as test building a block of flats constructed in Reunion island, which has a humid tropical climate. The sensitivity analysis allowed us to study the effects of both diffuse and direct solar radiation on our model of this building.

With regard to the choice and location of sensors, this stage of the study also led us to measure the solar radiation falling on the windows. The comparison of measured and predicted radiation clearly showed that our predictions overestimated the incoming solar radiation, and we were able to trace the problem to the algorithm which calculates diffuse solar radiation. By calculating view factors between the windows and the associated shading devices, changes to the original program allowed us to improve the predictions, and so this article shows the importance of sensitivity analysis in this area of research. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Model validation; Shadow mask; Sensitivity analysis; Diffuse solar radiation; Time–frequency analysis

### 1. Introduction

In recent years, major efforts have been made to develop methods for estimating the radiation flux falling on various surfaces (walls of buildings, solar and photo-voltaic panels, etc.). Many theoretical models are therefore available, covering both short and long wave radiation and also radiation sources (such as direct or diffuse radiation from the sky [1] or ground reflected diffuse radiation [2,3]).

With regard to the interaction of these fluxes with the envelope of a building, their coupling with other transfer phenomena has also been studied intensively [4,5]. These aspects can be successfully incorporated into program codes, provided we take into account accepted (and justified) assumptions concerning the solar radiation (such as the partition between short and long wavelengths, the ‘transparency’ of the air as far as radiation are concerned, etc.) and also concerning the walls and windows (unidirectional conduction heat exchanges, constant radiation properties, etc.).

The calculation of the impact of near or further shading devices is also well-known, carried out using either trigonometry [6,7] or other methods [8]. Design of shading

devices is easily accomplished by classical methods [9,10], but only in the case of direct beam radiation. However, most of the program codes do not calculate in detail the influence of near shading devices on diffuse radiation, apart from certain reference programs such as DOE-2 [11] and S3PAS [12]. In TRNSYS [13] for example, the shading reduction obtained for direct radiation is applied to the total incident radiation.

This article treats the solar radiation which enter a building through windows (or other glass frontages), and which are protected by a veranda, which is a very common set-up in tropical architecture. In this case, the simplifications mentioned earlier would lead us to overestimate the indoor solar radiation, and we will see that certain improvements should be made to the theoretical model.

### 2. The context of the study

#### 2.1. The climate

Reunion island is situated at a latitude of 21° south and a longitude of 55° east. The climate is humid tropical. There is a dry season (May–October), mainly cool and dry, predominated by the trade winds and a wet season (November–April),

\* Corresponding author.

E-mail address: lauret@univ-reunion.fr (A.J.P. Lauret).

hotter and wetter with light winds. In a humid tropical climate, the source of discomfort arises from a temperature increase due to bad architectural design, as far as insulation is concerned. Solar radiation accounts for 80% with the rest due to conduction exchanges. Under the humid tropical climate, the readings made on the short wave diffuse radiation show the importance of this kind of input. In particular, a quick analysis of the daily graphs on Reunion island shows often significant diffuse radiation when the direct beam is low. The diffuse radiation therefore represents a significant fraction of the total (40% on the coast and about 50% for the interior of the island).

As a result, the solar protection of windows is fundamental, not only because this represents 15–20% of the thermal gains, but also because the windows contribute to the increase in the discomfort experienced by the occupant, due to the instant heating of the ambient air temperature and exposure to direct or reflected sunlight. All the windows must therefore be protected by some sort of shading device (overhanging horizontal canopies, screens, shadow masks etc.).

## 2.2. The chosen building

We have experimented with a typical dwelling of collective housing in Reunion island. This assessment is part of a technical evaluation of the building standards [14] for French overseas territories. The dwelling, represented in Fig. 1, includes three bedrooms and a living room. A veranda in effect enlarges the living room through the use of large bay windows.

Our analysis is based on the temperatures measured in the living room, as the standard ECODOM concentrates exclusively on comfort improvement of living areas.

The measurement programme lasted throughout January 1998. For the meteorological data, equipment was set-up on the roof of the dwelling, giving half-hourly data for outdoor dry temperature, sky temperature, relative humidity, global and diffuse horizontal radiation and also wind speed and direction.

Ambient temperatures (dry and resultant) and relative humidity were measured in two places and at different heights in each room of the dwelling. Furthermore, some interior and exterior wall and roof surface temperatures were included in the experimental results.

## 2.3. The software CODYRUN

CODYRUN is a detailed building thermal simulation software regrouping design and research aspects. This software has already been covered in various publications [15–18]. Essentially, it involves multiple-zone software including natural ventilation and humidity transfer. Another key feature of CODYRUN is its multiple-model aspect. Indeed, before one simulation, the expert user has the possibility to choose between different models. The counterpart

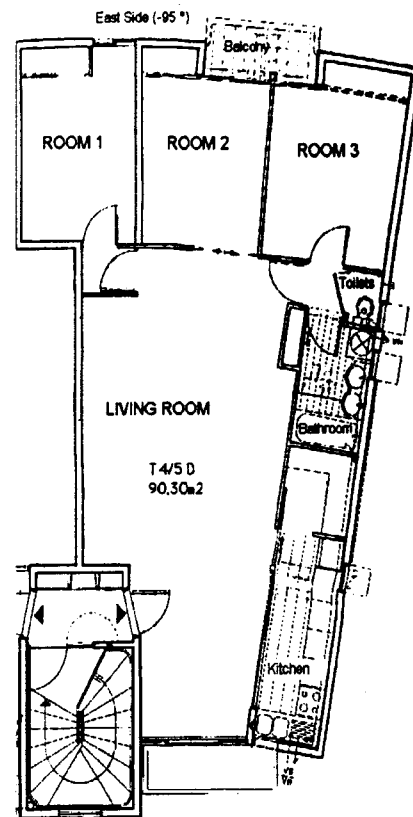


Fig. 1. Typical dwelling.

of this flexibility is the necessity for the building physics researcher to set-up various models of different accuracy for each physical phenomenon.

The multiple-model aspect is detailed in [16], the thermal model in [17], the pressure airflow in [18], the data-structuring and the description of the front-end in [15]. Paper [14] focuses on both guidelines for tropical climate based on simulations with CODYRUN and split system modelling embedded in the software.

With regard to the validation of the program, CODYRUN was successfully 'BESTESTed' [19] and compared with other in situ measurements.

For the building chosen for this study, because of the large surface area of the bay windows (particularly on the west side), the largest energy source is from solar radiation. The performance of the building is therefore heavily influenced by the incoming radiation. It is recognised that for homes in cold climates with moderately sized windows and high levels of foundation insulation, energy simulation software should be fairly accurate [20]. The afore-mentioned article emphasises that for homes in hot climates, with large solar apertures and thermal mass, the situation is less clear. Simulation results for these situations should be used with caution.

Bearing in mind these elements, a recognised step-by-step validation procedure was used, including in particular a

sensitivity analysis which is discussed in the following section.

### 3. Use of sensitivity analysis to plan the experiment

Sensitivity analysis (SA) of the model output is a very important stage in model building and analysis. In the building thermal simulation field, SA is being applied more and more [21–24]. Indeed, SA can help increase the reliability of the predictions made by building thermal simulation software.

This method identifies the most influential factors and inputs and evaluates their effect. In the validation methodology, the results are helpful as they give precise information on how to plan experiments. In particular, SA pinpoints the parameters or inputs that must be known accurately. In this way, we know which special measurements should be performed to ensure reliable predicted results.

#### 3.1. The methodology

Using a MATLAB program which was specially developed for the chosen building, we conducted a sensitivity study, with the aim of determining the most significant parameters and input data for the prediction of the indoor dry air temperature. The analysis was complete, in the sense that it treated both parametric variables (material properties associated with the building envelope) and non-parametric (meteorological data). We will not give details of the method, as these can be found in another article [25].

The proposed method involves performing several simulation runs by oscillating each input sinusoidal over its range of interest. Analysing the spectrum (Fourier transform or power spectral density) of the output reveals the most influential factors.

Here, 1024 simulations were performed by making each factor (input or parameter) vary as a sinusoid ranging over  $\pm 10\%$  with respect to its base-case value. In the following study, we are looking for the most important parameters for the predicted indoor air temperature; once the simulations are achieved we can calculate the power spectral density (PSD) of the residual.

As PSD is defined as the spectral decomposition of a signal's variance, we evaluate the influence of each parameter upon the output calculating the variance of the temperature differences ( $\text{var}(\Delta T_i)$ ) due to each parameter.

#### 3.2. Results

The figure below shows that the input data and parameters which account for 90% of the residual variance are: direct and diffuse solar radiation, concrete walls thickness, density and specific heat capacity. These latter three parameters represent, in effect, the thermal inertia of the building. As far

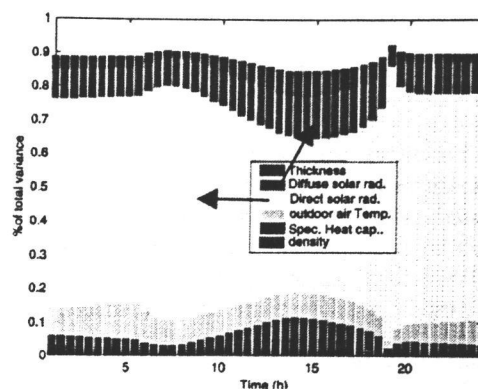


Fig. 2. Assessment of the most important parameters.

as the heat sources are concerned, this study clearly shows the importance of properly taking into account solar heat gains (both direct and diffuse) (Fig. 2).

We note in particular that the contribution due to diffuse solar radiation increases at 3 p.m.

As the absorptance of the walls for short wavelengths do not appear in the preceding analysis, the sensitivity of the apartment to short-wave radiation depends on solar gains through the windows.

Therefore, in order to determine the interaction between the building envelope and the outside solar radiation, in addition to the measurements mentioned earlier, we introduced two pyranometers on each side of the largest bay window. This was in the living room, facing west and so heavily exposed in the afternoon. In the photograph below, one can see the bay window as well as the shading screen. In this way, we obtained a measurement of the global incident solar radiation (without the shading effect, because this was placed at the edge of the plant tub) and of that transmitted by the bay (after the effect of the shading device and the glass) (Fig. 3).

The initial detailed simulation software (CODYRUN) was modified to include the exterior global and interior radiation calculations (for each window) in the output file.



Fig. 3. The dwelling (west side).

#### 4. Initial comparison of model and measurements

For this 'initial' comparison, the diffuse exterior are considered to be unaffected by the presence of near-field shading. For the weather conditions experienced at the time of the measurements, all the exterior and interior openings were closed and cautiously sealed. The building was therefore behaving in a thermally pure mode, with no incoming airflow. For modelling purposes, five zones were considered, including the zone 'living room'. All our analysis is centred on comparisons of measurements with the model for dry air temperatures in the living room.

Figs. 4 and 5 show the comparison between the predicted indoor dry air temperature in the living room and its measurement. The maximum acceptable measurement error is  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . As the residual does not fall within these limits, the model is rejected. The mean and standard deviation are the following:

| Mean  | S.D.  |
|-------|-------|
| -0.39 | 0.369 |

To find the source of the error, one has to search for correlation between the inputs and the residual. This study

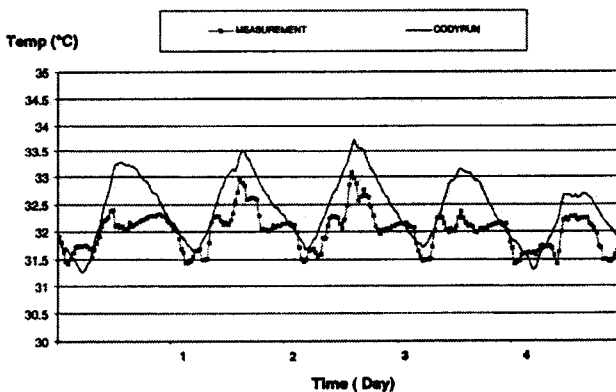


Fig. 4. Dry air temperature of the living room.

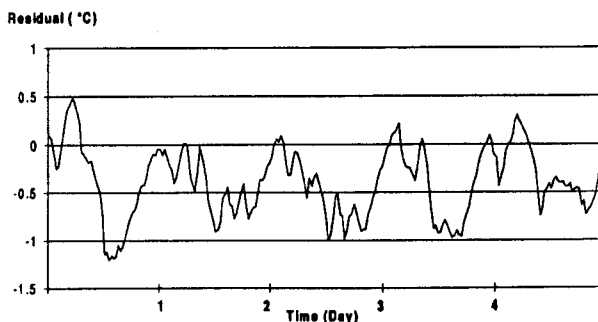


Fig. 5. Residual.

may guide the building physics researcher in the right direction for improving the model.

##### 4.1. Use of time-frequency analysis

Instead of classical spectral analysis [26,27] that shows some limitations when the inputs are correlated (as in the case of meteorological data), time-frequency analysis is a powerful tool capable of de-segregating the actual effects of several inputs at different time-scales.

Time-frequency analysis is a modern technique to extract information from signals. The first and natural time-frequency tool is the short-scale Fourier transform (SFTT). The key feature of these tools is that they simultaneously decompose a signal in time and frequency. One can imagine that the information obtained is richer than that given in only spectral or in time domain analysis. The representation of an SFTT is called the spectrogram. The goal of our study is to check whether the spectrogram of the residual is similar to the one of the inputs.

In order to obtain useful spectrograms, low frequency data must be filtered out. For this purpose, a fourth-order Butterworth is used to remove frequencies lower than  $0.02\text{ h}^{-1}$ . Filtering is justified in our case as the range of interest is around 1 per day harmonic ( $\sim 0.041\text{ h}^{-1}$ ).

Unlike classical spectral analysis, spectrograms of climatic data show that the time-frequency signature of the outdoor air temperature is very different from that of the solar radiation. It is possible here to distinguish outdoor air temperature from the other inputs. The main drawback of classical frequency analysis is avoided.

##### 4.2. Application to our case

Spectrograms of diffuse and direct solar radiation illustrate the complementarity of these two inputs. Consequently, it will be difficult to identify which of these two inputs is really correlated with the residual. Nevertheless, physically, the influence of the diffuse component seems more relevant. Comparison of the two spectrograms clearly shows a correlation between diffuse solar radiation and the residual at times 90 and 130. The source of the error seems to be in the way the model account for diffuse solar radiation (Fig. 6).

#### 5. Improvement of the model

##### 5.1. Comparison of incoming radiation

Because of the two pyranometers installed after the sensitivity analysis, we are able to compare the global exterior solar radiation with the interior one, both for the actual measurements and for the model predictions. Given that the agreement for the exterior values is excellent, we clearly see that our initial model overestimates by 30–40%,

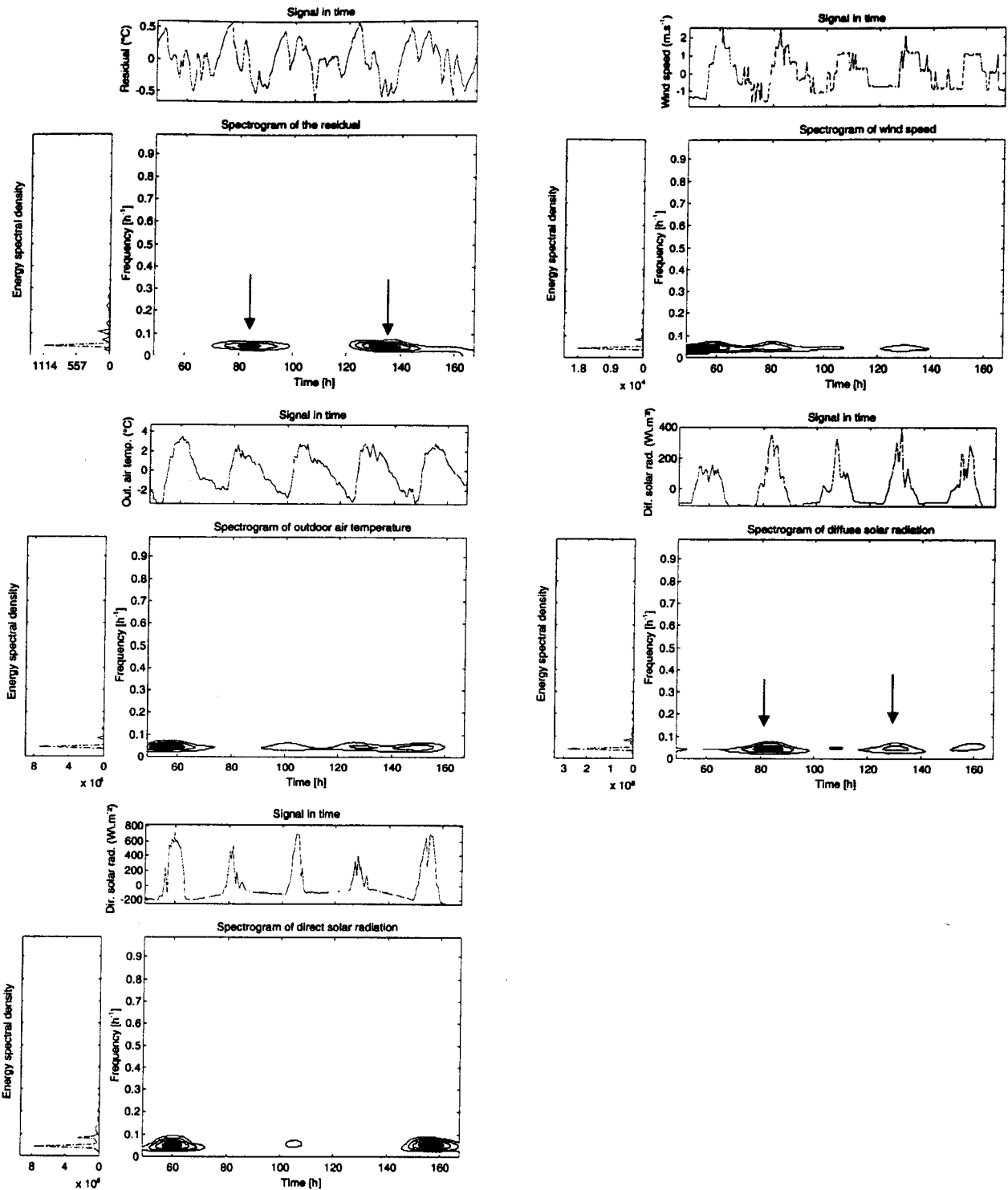


Fig. 6. Spectrograms of the residual and the inputs.

the interior radiation contributions in the living room (see Fig. 7).

Considering that the measurement error is approximately 6%, and that the error due to imprecise positioning of the

pyranometers is neglectable, an error of 30–40% is evidently very significant. Further, as the sensitivity analysis had shown that the transmittance of the glass was not an important factor, the near shading device formed by the protection

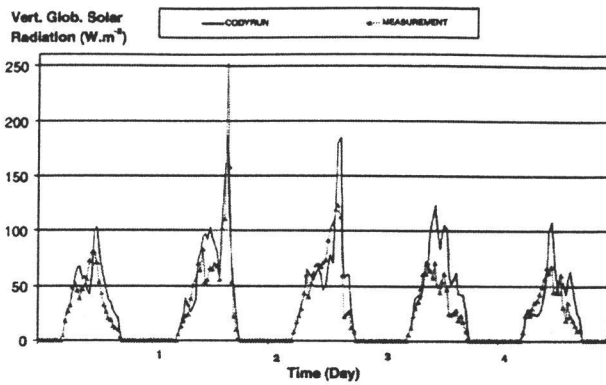


Fig. 7. Comparison of the global solar radiation.

around the west bay window is clearly responsible for the overestimation of the solar gains. As CODYRUN has already been tested with respect to the effect of shading devices on the direct radiation [19], we decided to improve the model by introducing the possibility of reducing the diffuse solar radiation with near shading devices.

5.2. The chosen method

As a near shading device is generally composed of several elements (top-flap, vertical fins, low walls, etc.), the calculation of the analytic shape factor involving the window and the shading device proved complex. We therefore preferred a simplified approach which uses properties of the view factors. By using projections perpendicular to the planes containing the windows and each element of the shade, the calculation of the global shape factor can be achieved by combining several view factors of the same type; these view factors are those obtained for orthogonal parallelepipeds with a common edge [27] (Fig. 8).

For the west bay window which concerns us here (see Fig. 3), this approach requires us to find, in the following Fig. 9, the view factor between the window (coloured grey) and the elements composing the shade (hatched).

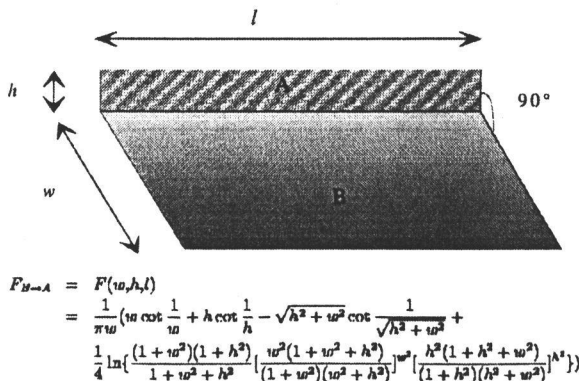


Fig. 8. Calculation of the shape factor.

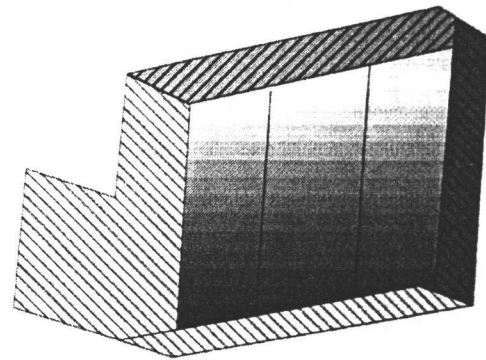


Fig. 9. The bay window in its egg-crate.

As a first step, we limited ourselves to one dimension per element of the shade. In this way the left side was represented by a parallelepiped of width equal to the top side. An alternative, more comprehensive approach has been tried, but was not integrated into the program, because of the small (approximately 1%) reduction obtained.

One should note that our method does not take into account the solar radiation reflected off the shade. This has been studied by Barozzi [6] for example, and could prove useful for a more detailed calculation of the radiation diffused around the window. Finally, the calculation for a near shading device uses a constant percentage of reduction for the diffuse solar radiation.

5.3. Integration into CODYRUN

Fig. 10 describes the data inputs associated to the west bay window. The dimensions of the elements composing the shade are given in a standard way. Some parts of the data

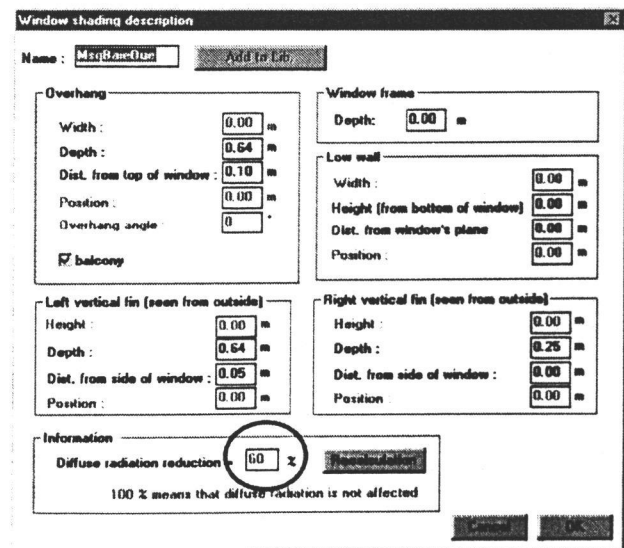


Fig. 10. Shadow mask data capture window.



input window are disabled because some of these dimensions are considered infinite (the width of the top flap, for example).

Given the importance of the effect of the near shading devices on the incident diffuse around the window (see the preceding method), the percentage of reduction of diffuse is now indicated and taken into account at each step of simulation.

In the case which interests us, 60% of the incident diffuse radiation on the west wall are blocked by the near shading device before reaching the glass.

## 6. New comparison

### 6.1. Comparison of fluxes

In the interior, the new model is manifestly better than the old one at calculating the radiation transmitted into the zone. The relative average daily error in the density of transmitted flux has changed from 22 to 4% over the whole period. In particular, the prediction due to the model is much improved during days 4 and 5, which correspond to the periods when the diffuse radiation was dominant (the relative error is reduced from 32 to 1% in days 4 and 5) (Fig. 11).

It should be noted that the model used here to represent the diffuse radiation is known as 'isotropic'. Other simulations have shown us that, as could be expected, the choice of a non-isotropic model (in which some of the diffuse radiation is directional) modifies slightly the incoming energy contributions. In fact, the direct and diffuse parts of the flux falling on the bay window are, respectively reduced by the direct solar factor associated with the shading device and the reduction factor for the diffuse part. Our building model is therefore sensitive to the diffuse radiation reconstitution.

### 6.2. Comparison of temperatures

The variable which interested us most was the dry air temperature in the living room, and the modification of the model led to a better prediction of this temperature (Fig. 12).

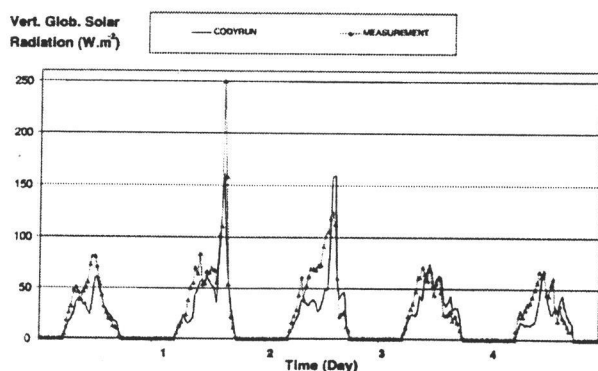


Fig. 11. New comparison of the global solar radiation.

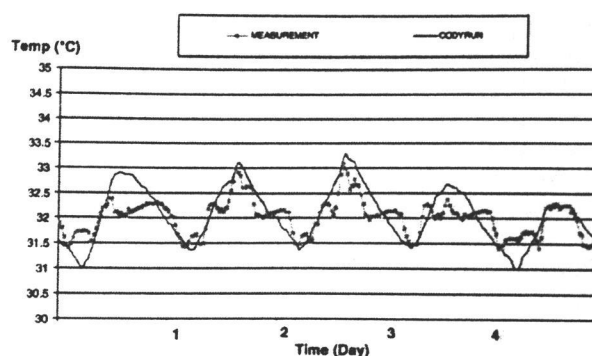


Fig. 12. New comparison of the dry air temperature.

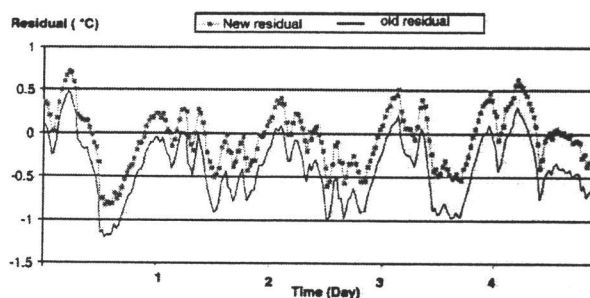


Fig. 13. New and old residual.

Thus, over the 5 day sequence considered, the average residual changed from about 0.4 to 0°C, with a standard deviation of about 0.3°C slightly improved (from 0.37 to 0.34). Further, by concentrating the study on 1 day when the diffuse solar radiation was more important, an even better improvement was observed.

Regarding the validation, the new model has allowed us to increase the number of points for which the residual is included within the maximum acceptable error limits, that is  $-0.5$  to  $+0.5$ °C (Fig. 13).

As the residual curve obtained was nearly always within these limits, the new building model is therefore considered as improved.

| Mean  | S.D.  |
|-------|-------|
| -0.04 | 0.336 |

We should note however that the method only leads to an improvement in the prediction of the steady-state (correction of the mean). It is nevertheless an important step, which has to be completed before moving on to improve the prediction of the dynamic response.

## 7. Conclusion

We have used a step-by-step approach to validate the thermal behaviour of a simulation program. We have seen

the advantages of a systematic application of the validation procedure. The sensitivity analysis combined with appropriate sensors has allowed us to highlight the weaknesses of the model for calculating the energy contributions due to diffuse solar radiation from the windows. In the case of experimental validation, sensitivity analysis has once again proved its ability to be a powerful tool for improving simulation models.

Regarding the aspects as basic as the calculation of the solar gains due to the windows, it is noteworthy that the use of computer codes written for an architecturally and climatically different context should be done with care. In conclusion, this paper illustrates that under our tropical climate and for the architectural rules currently applied, an adapted model must be used.

## References

- [1] A. Lebru, Estimation des irradiations solaires horaires dans un plan quelconque à partir de la donnée de l'irradiation horaire globale (et éventuellement diffuse) horizontale, Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1983, No. 239, Cahier, 1847, p. 39.
- [2] P. Ineichen, R. Perez, R. Seals, The importance of correct albedo determination for adequately modeling energy received by tilted surfaces, *Solar Energy* 39 (4) (1987) 301–305.
- [3] P. Ineichen, A. Zelenka, O. Guisan, A. Razafindraibe, Solar radiation transposition models applied to a plane tracking the sun, *Solar Energy* 41 (4) (1988) 371–377.
- [4] A.J. Ness, Solution of a thermal network on a digital computer, *Solar Energy* 3 (1) (1959) 37.
- [5] B.A. Price, T.F. Smith, Thermal response of composite building envelopes accounting for thermal radiation, *Energy Conversion and Management* 36 (1) (1995) 23–33.
- [6] G.S. Barozzi, R. Grossa, Shading effect of eggcrate devices on vertical windows of arbitrary orientation, *Solar Energy* 39 (4) (1987) 329–342.
- [7] R.E. Jones Jr., Effects of overhang shading of windows having arbitrary azimuth, *Solar Energy* 24 (4) (1980) 305–312.
- [8] D. Caccavelli, Modélisation du comportement thermique des Bâtiments multizones: adaptation à un processus de conception, Thèse: Sci., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988, p. 477.
- [9] A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control and Shading Design*, Wiley, New York, 1977.
- [10] E. Mazria, *The Passive Solar Energy book*, Rodale Press, Emmaus, PA, 1979.
- [11] D. York, C. Cappiello, DOE-2 Engineer's Manual, in: C.A. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, November 1981.
- [12] S3PAS 1.0, Simulacion de Sistemas Solares Pasivos, Manual de Usuario, Catédra de Termotecnia, ESII, Sevilla, 1988.
- [13] TRNSYS, A transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI, 1990.
- [14] 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 (1) (1998) 71–84.
- [15] H. Boyer, Conception thermo-aerulique de Bâtiments multizones proposition d'un outil à choix multiples de modèles, Ph.D. Thesis, Institut National des Sciences, Appliquées de Lyon, France, 1993.
- [16] H. Boyer, F. Garde, J.C. Brau, J. Gatina, A multi model approach of thermal building simulation for design and research approach, *Energy and Building* 28 (1998) 71–78.
- [17] H. Boyer, J.P. Chabriat, B. Grondin Perez, C. Tourrand, J. Brau, Thermal building simulation and computer generation of nodal models, *Building and Environment* 31 (3) (1996) 207–214.
- [18] 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.
- [19] T. Soubdhan, T.A. Mara, H. Boyer, A. Younès, Use of BESTEST procedure to improve a building thermal simulation program, World Renewable Energy Congress, Brighton, U.H., Part III, 1–7 July 2000, pp. 1800–1803.
- [20] Energy Design Update, April 1996, pp. 5–15 (Source: AIVC recent additions to airbase, no 73, September 96, p. 3).
- [21] K. Lomas, H. Eppel, Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, *Energy and Buildings* 19 (1992) 21–44.
- [22] J.M. Furbringer, Sensitivity Analysis for modellers, *Air Infiltration Review* 17 (4) (1996).
- [23] N. Rahni, N. Ramdani, Y. Candau, G. Guyon, Application of group screening to dynamic building energy simulation models, *Journal of Statistical Computer Simulation* 57 (1997) 285–304.
- [24] P. Aude, C. Beghein, P. Depecker, C. Inard, Perturbation of the input data of models used for the prediction of turbulent air flow in an enclosure, *Numerical Heat Transfer Part B* 34 (2) (1998) 139–164.
- [25] T.A. Mara, F. Garde, H. Boyer, M. Mamode, Empirical validation of the thermal model of a passive solar test-cell, *Energy and Buildings* 31 (2001) 589–599.
- [26] N. Ramdani, Y. Candau, S. Dautin, S. Delille, N. Rahni, P. Dalicieux, How to improve building thermal simulation programs by use of spectral analysis, *Energy and Buildings* 25 (1997) 223–242.
- [27] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, 3rd Edition, Wiley, New York, 1996.

## Empirical validation of the thermal model of a passive solar cell test

Thierry Alex Mara\*, François Garde, Harry Boyer, Malik Mamode

University of La Réunion Island, Laboratoire de Génie Industriel, BP 7151,  
15 Avenue René Cassin, 97 715 Saint-Denis, France

Received 3 September 2000; accepted 30 September 2000

### Abstract

The paper deals with an empirical validation of a building thermal model. We put the emphasis on sensitivity analysis and on research of inputs/residual correlation to improve our model. In this paper, we apply a sensitivity analysis technique in the frequency domain to point out the more important parameters of the model. Then, we compare measured and predicted data of indoor dry-air temperature. When the model is not accurate enough, recourse to time–frequency analysis is of great help to identify the inputs responsible for the major part of error. In our approach, two samples of experimental data are required. The first one is used to calibrate our model, the second one to really validate the optimized model. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Building thermal simulation; Model validation; Calibration; Sensitivity analysis; Spectral analysis; Time–frequency analysis

### 1. Introduction

The improvement of building thermal behaviour is a very important challenge because of the worldwide energy needs. The use of building thermal simulation software is necessary to achieve this task. But, before using such a program, one must ensure that its results are reliable. To do so, a methodology of validation must be applied including the verification of numerical implementation and experimental validation. At University of La Réunion Island, we have developed a dynamic building thermal simulation software called CODYRUN (see Ref. [1] for more details). Recently, we checked the software programming using an inter-program comparison procedure called BESTEST (cf. Ref. [2]). In this paper, we present the empirical validation of the thermal model of a real cell test built with our dynamic simulation program.

Empirical validation is a very important stage in the methodology of validation. However, when comparison between measured and predicted data fails, it is interesting to search for the causes of disagreement which principally

derive from:

1. error measurements;
2. underestimation of the actual value of one or more parameters;
3. an error in the model (assumptions, programming error, etc.).

Parametric sensitivity analysis (SA) of the studied model should allow to check point (2). Moreover, this analysis is very interesting as it allows to point out the most influential factors. The latter should be known accurately before carrying out measurement/prediction comparison. Normally, the total uncertainty in outputs (due to all inputs uncertainties) and uncertainty in measurement (due to the sensors accuracy) are compared. Then, if the intervals overlap during all the period of measurement, the model is deemed to be *valid*. As far as we are concerned, we only take into account the uncertainty on the measured data (indoor dry-bulb temperature). So, if the predicted output does not fall in the uncertainty bands, the model is rejected. Then, the source of discrepancy is investigated by analysing the residual (difference between measurement and prediction).

The classical approach consists in searching for inputs/residual correlation. For this purpose, recent works showed that, concerning empirical validation of building thermal simulation programs, spectral analysis tools are useful. In

\* Corresponding author. Tel.: +33-262-93-82-24;  
fax: +33-262-93-86-65.  
E-mail address: mara@univ-reunion.fr (T.A. Mara).

### Nomenclature

|           |  |
|-----------|--|
| $C_i$     | node thermal capacitance ( $J m^{-2} K^{-1}$ )   |
| $C_p$     | specific heat ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )   |
| $e$       | thickness (m)  |
| $F_{pc}$  | view factor between a wall and sky   |
| $F_{pe}$  | view factor between a wall and environment   |
| $h_{rc}$  | outdoor surface radiative heat transfer coefficient with fictive sky temperature ( $W m^{-2} K^{-1}$ ) |
| $h_{re}$  | outdoor surface radiative heat transfer coefficient with the environment ( $W m^{-2} K^{-1}$ )         |
| $K_i$     | node thermal conductance ( $W m^{-2} K^{-1}$ )   |
| $T_{ao}$  | outdoor dry-bulb temperature (K)   |
| $T_{so}$  | outdoor wall (or window) surface temperature (K)   |
| $T_{env}$ | fictive environment temperature (K)  |
| $T_{sky}$ | fictive sky temperature (K)  |

### Greek symbols

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $\alpha_o$               | outdoor surface absorptance of short-wave radiation          |
| $\lambda$                | conductivity ( $W m^{-1} K^{-1}$ )                           |
| $\rho$                   | density ( $kg m^{-3}$ )                                      |
| $\sigma_x^2$ or $var(x)$ | variance of variable $x$                                     |
| $\tau$                   | solar transmittance  |
| $\varphi_{lwo}$          | outdoor long-wave heat flux radiation density ( $W m^{-2}$ ) |

In this paper, we demonstrate that those tools are sometimes inefficient and can be advantageously completed with time-frequency analysis. Anyway, expertise in experimental design and modelling are necessary to determine whether the cause of disagreement comes from point (1) or (3).

## 2. Application to a real cell test

### 2.1. The real building description

The survey concerns a real cell test that was erected at University of La Réunion Island for experimental validation of building thermal airflow simulation software [3]. After describing the *building* and recalling some model assumptions, we will apply the methodology previously introduced to *validate* (actually calibrate) our model.

The studied cell test is a cubic-shaped building with a single window on the south wall and a door on the north one. All vertical walls are identical and are composed of cement fibre and polyurethane, the roof is constituted of steel, polyurethane and cement fibre and the floor of concrete slabs, polystyrene and concrete (see Table 1 for more details concerning the walls constitution). The building under consideration is highly insulated. Fig. 1 shows a picture of the cell test and on the left, the weather station that provides solicitations (inputs) to our model.

### 2.2. The model description

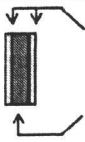
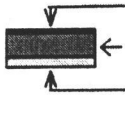
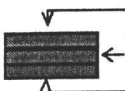
A lumped approach [1] is used to represent the building. It is based on the analogy between Fourier's equation of conduction and Ohm's law. Such a model leads to a system of equations, called state equations, which in the matrix formalism has the following form:

$$C\dot{T} = AT + B \quad (1)$$

where  $A$  is the state matrix,  $B$  the solicitations vector,  $C$  the capacitances matrix,  $T$  the state vector including the temperature of the lumped elements, and  $\dot{T}$  the derivative of  $T$ .

In this survey, we consider the electrical/thermal analogy representation of heat transfer by conduction through walls

Table 1  
Description of the walls of the studied building

| Type of walls  | Illustration  | Materials       | Thickness (m) | Conductivity ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) | Specific heat ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ) | Density ( $kg m^{-3}$ ) |
|----------------|---|-----------------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Vertical walls |  | Cement fibre    | 0.005         | 0.95                               | 1003                                 | 1600                    |
|                |   | Polyurethane    | 0.06          | 0.03                               | 1380                                 | 45                      |
| Roof           |  | Sheet steel     | 0.003         | 163                                | 904                                  | 2787                    |
|                |   | Polyurethane    | 0.05          | 0.03                               | 904                                  | 2787                    |
|                |   | Cement fibre    | 0.005         | 0.95                               | 904                                  | 2787                    |
| Floor          |  | Concrete slabs  | 0.04          | 1.75                               | 653                                  | 2100                    |
|                |   | Polystyrene     | 0.04          | 0.04                               | 1380                                 | 25                      |
|                |   | Weight concrete | 0.12          | 1.75                               | 653                                  | 2100                    |
| Door           | None  | Plywood         | 0.018         | 0.23                               | 1500                                 | 600                     |

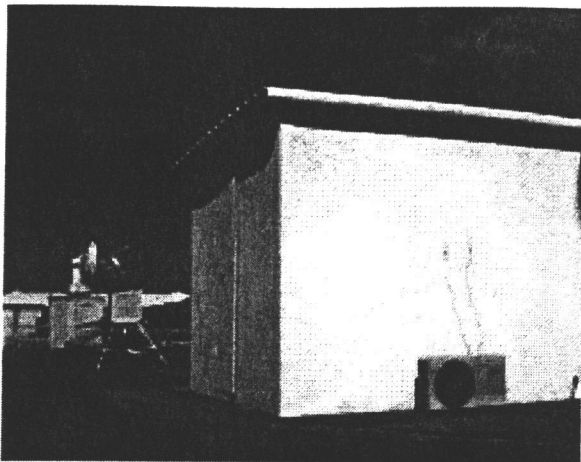
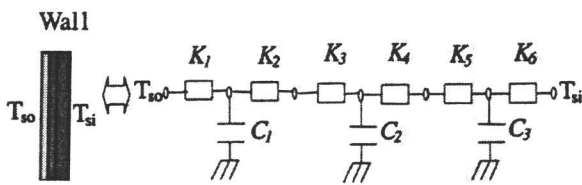


Fig. 1. Picture of the test-cell view from north-west.



Scheme 1. Wall spatial discretization and representation.

(cf. Scheme 1) which consists in discretizing a wall with three nodes per layer.

The thermal capacitances ( $C_1, C_2, C_3$ ) and the thermal conductances ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ ) of a layer are, respectively, function of its thickness, specific heat, density ( $e, C_p, \rho$ ) and thickness, conductivity ( $e, \lambda$ ).

2.2.1. Assumptions

Nodal analysis assumes that heat transfer by conduction through the walls are mono-dimensional. Indoor radiant heat transfer is linearized and the radiative exchange coefficients are taken identical for each wall. For outdoor long-wave radiative heat exchange, we use the following model:

$$\phi_{lwo} = h_{rc} F_{pc} (T_{sky} - T_{so}) + h_{re} F_{pe} (T_{env} - T_{so})$$

with  $T_{sky} = T_{ao} - 6, T_{env} = T_{ao}$

It is not an easy task to measure sky temperature ( $T_{sky}$ ) and models are usually used. Models of this temperature generally take the form of correlations with other parameters. Previous studies (Ref. [3]) lead us to the proposed correlation with  $T_{ao}$ . In the same way, environmental temperature is usually deemed to be equal to outdoor air temperature.

Indoor convective exchange coefficients are assumed constant for each wall whereas outdoor convective coefficients are function of wind speed and direction. For the latter, we choose the correlation of Sturrock [4]. We assume that heat flux under the floor is null. This assumption is reasonable in the studied building since the floor is thermally uncoupled from the ground.

3. Parametric SA

SA of model output is a very important stage in model building and analysis. It is applied in simulation studies in all kinds of disciplines. In building thermal simulation field, SA is more and more applied [5–9]. Indeed, SA can help increase reliability in building thermal simulation software’s prediction. We use the method introduced in Ref. [9] to identify the most influential factors and evaluate their effect. The proposed method consists in performing several simulation runs by oscillating each parameter sinusoidally over its range of interest. Analysing the spectrum (Fourier transform or power spectral density) of the output, identification of the most influential factors can be easily derived.

We perform 1024 simulations by making each factor vary as a *sinusoid* ranging  $\pm 10\%$  with respect to its base value. In the following study, we are looking for the most important parameters upon the predicted indoor air temperature. So, once the simulations are achieved, we calculate the power spectrum density (PSD) of  $\Delta T_i = T_{i,base} - T_{i,evol}$ , where  $T_{i,base}$  is the indoor air temperature obtained with the factors base value at time  $i$ , and  $T_{i,evol}$  the indoor air temperature obtained with the different simulations at time  $i$ .

As PSD is defined as the spectral decomposition of a signal’s variance, we evaluate the influence of each parameter upon the output by calculating the amount of the variance of the gaps ( $var(\Delta T_i)$ ) due to each parameter.

3.1. Results

Though the influence of a parameter depends on the solicitations, we focus only on 1 day. In effect, the important factors remain the same, whatever the day is, but their contribution changes depending on the inputs. Fig. 2 shows the hourly amount of the variance of  $\Delta T$  due to the most influential parameters, more precisely those who explain more than (almost) 1% of  $var(\Delta T)$  at a given time. These 11 parameters explain between 80 and 90% of the total variance of the gaps. The remaining amount should be explained by the low effects of the other factors and eventually interactions.

We can note that the influence of the solar window’s transmittance is high during the day and progressively decreases during the night. On the contrary, the effects of

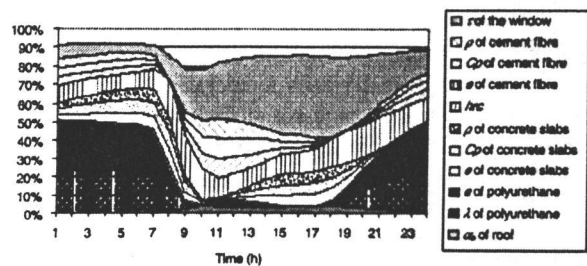


Fig. 2. Decomposition of the variance of the gaps versus the 11 most important parameters.

the variation of the polyurethane's thermal properties (thickness and conductivity) are important during the night and negligible during the day. At last, it is interesting to note that the influence of  $h_{rc}$  is constant and is due to the way it is taken into account in the model (see Section 2.2.1).

The principal influential factors ranked in order of importance are:

- solar transmittance of the south window;
- thickness and thermal conductivity of the polyurethane;
- outdoor surface radiative heat transfer coefficient with the environment ( $h_{rc}$ );
- thermal properties of cement fibre;
- thermal properties of concrete slabs on the floor.

### 3.2. Discussion and physical interpretation

Physically,  $\rho$ ,  $C_p$  and  $e$  of a material correspond to its thermal capacitance whereas  $e$  and  $\lambda$  represent its thermal resistance. So, one can notice that it is the thermal inertia of the cement fibre and concrete slabs that have an influence on indoor air temperature. On the other hand, concerning the polyurethane, it is its thermal resistance that has an effect on indoor air temperature. This last result explains why the contribution of the polyurethane's thickness is equal to the one of its conductivity anytime and ditto for the thermal properties of cement fibre and concrete slabs. The latter result corroborates those found by Ezzamari et al. [8] who used another SA approach to identify the most important factors in a building thermal model.

Window's transmittance is found to be the most important factor. This result is expected as radiation passing through the window is the first heat source since the cell test's walls are insulated (polyurethane, polystyrene). The preponderance of outdoor radiative heat transfer coefficient with the fictive sky temperature ( $h_{rc}$ ) shows that great care should be taken when outdoor radiative heat transfer is linearized.

## 4. Model's calibration

### 4.1. The experimental set-up

An experimentation was conducted during September (fresh season) of 1996. Among others (humidity, surface temperatures, etc.), two kinds of measurements were made within the cell test: dry-bulb temperature and black globe temperature. Sensors were set at three different heights to take into account air stratification (Fig. 3).

The aim of this study is to check the ability of our dynamic building simulation program to model the thermal behaviour of the cell test in the simplest configuration. Consequently, the window was set on the south wall so that only diffuse solar radiation got into the room (south hemisphere).

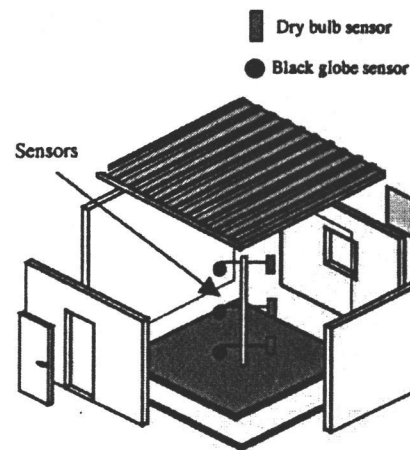


Fig. 3. Instrumentation of the cell test.

A weather station measured the following climatic solicitations:

- outdoor dry-bulb temperature;
- horizontal direct solar radiation;
- horizontal diffuse solar radiation;
- relative humidity;
- wind speed;
- wind direction.

Data were sampled every minute and averaged every hour. The experimentation lasted 14 days.

### 4.2. Weather data analysis

Direct solar radiation is high during the first days whereas the following 3 days are cloudy as diffuse solar radiation is high (cf. Fig. 4). Wind speed seems to be correlated to direct solar radiation. In effect, when direct solar radiation is high, wind speed increases (cf. 11th day and 12th day). Most of the time, the wind comes from east ( $270^\circ$ ) and corresponds to trade winds.

### 4.3. Comparison of measured and predicted data

Black globe temperatures are identical to dry-air temperatures (not shown). So, the basis for comparison is taken as the average of the three dry-bulb sensors. The uncertainty on measured temperature is  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

We compare the predicted and measured indoor air temperature after taking off the first 2 days (because of the warm-up period). Analysis of time variation of the plots shows that there is no delay between measurement and prediction and that the residual is higher during the night (cf. Fig. 5). As the residual does not fall in the measurement uncertainty intervals, the model is rejected. The mean and standard deviation of the residual are  $0.27$  and  $0.368^\circ\text{C}$ , respectively.

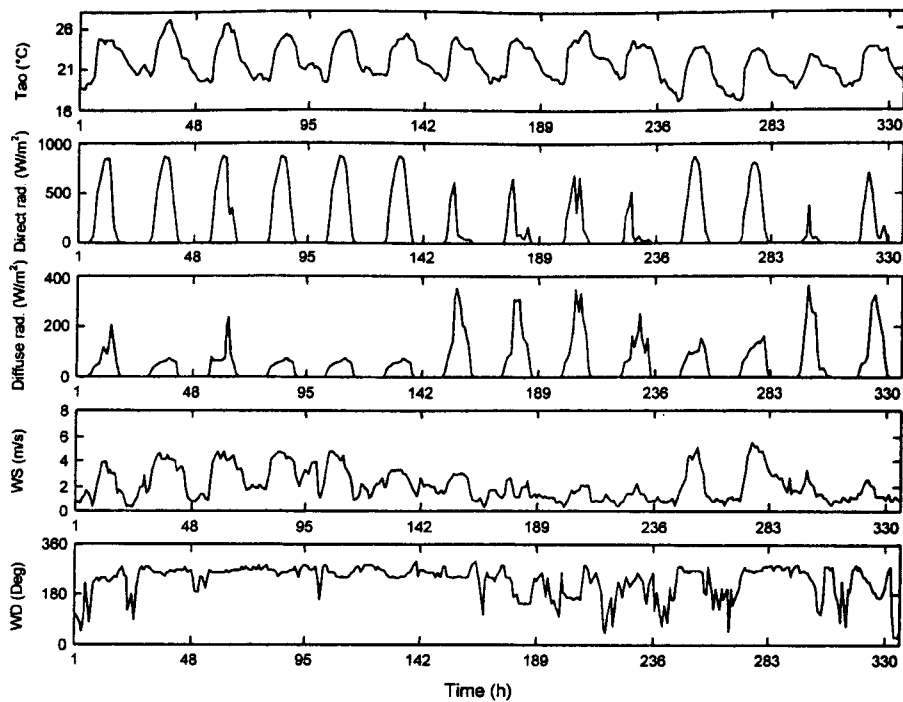


Fig. 4. Weather data.

To find the error origins, we first search for correlations between inputs and the residual. Indeed, building thermal simulation programs are generally linear with regard to inputs. As far as our code is concerned, it is the case (see Eq. (1)). So, when the comparison between measurement and prediction fails, it is expected that the residual (measured–modelled) is correlated to one of the inputs at less. This study is interesting as the information found may help the analyst to search in the good direction to improve his model. Moreover, compared to SA, this study is inexpensive as it requires no more simulation runs.

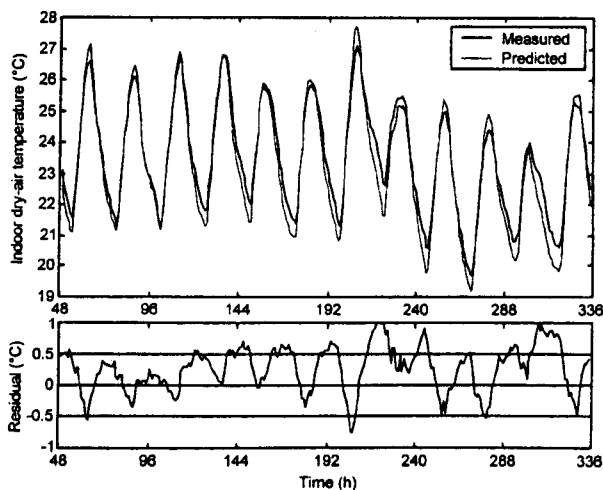


Fig. 5. Comparison of measured/predicted indoor air temperature in the cell test.

#### 4.4. Inputs/residual correlations survey

There are different tools and tests to quantify the dependence between two or more signals [10]. For instance, cross-correlation for time dependence or squared coherency in the spectral field. Ramdani et al. [11] recommend spectral analysis to improve building thermal models. In the following, we first attempt to identify correlation between the residuals and the weather data by use of those tools. To exhibit correlation between two signals (for instance, inputs/residual), they use a statistical test in the spectral field. Hence, two signals are said significantly correlated if at a given frequency, their squared coherency is greater than an associated threshold called: the non-zero coherency (see Refs. [9,10] for more details). Then, a decomposition of prediction error variance in terms of inputs contribution is calculated in order to identify the inputs which are not correctly taken into account. To do so, conditioned signals are estimated. Concerning the latter decomposition, the authors indicate that the less the inputs are correlated the better the variance disaggregation. However, it is important to note that the tools named above require stationary signals.

##### 4.4.1. Spectral analysis

The smoothed power spectral density of the residual (cf. Fig. 6) shows that the power of this signal is confined around  $0.041 \text{ h}^{-1}$  (the  $1 \text{ day}^{-1}$  harmonic) and in low frequency. Consequently, we are going to search for the inputs that are correlated to the residual on these frequency ranges. First, let us analyse correlations between inputs. The test of non-zero

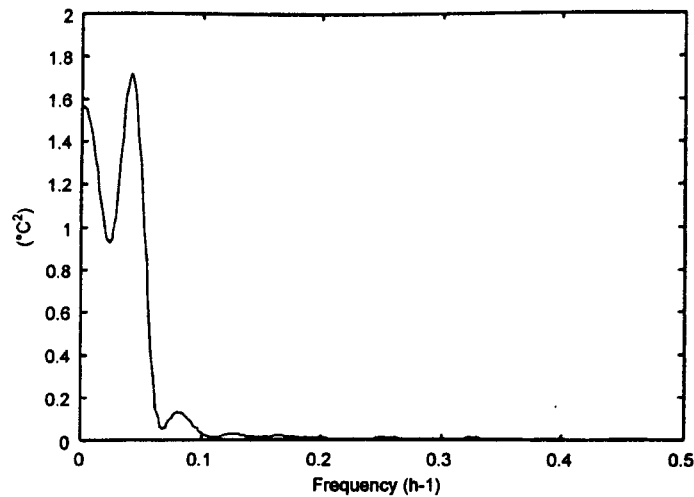


Fig. 6. PSD of the residual.

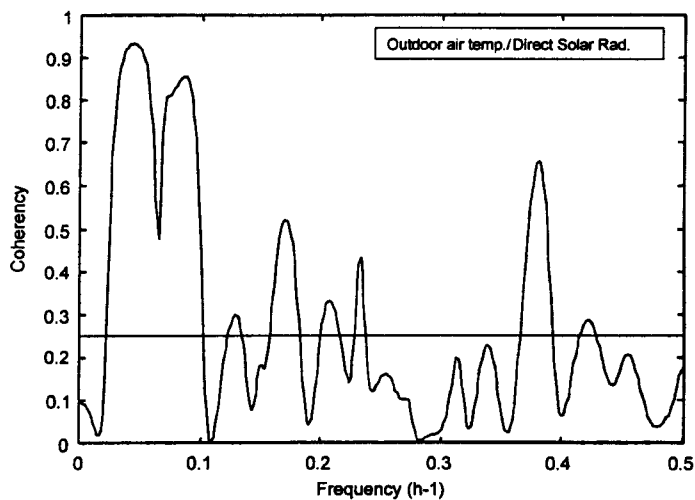


Fig. 7. Correlation between outdoor air temperature/direct solar radiation.

coherency between outdoor air temperature and direct solar radiation (cf. Fig. 7) shows that these two inputs are significantly correlated around  $0.04$  and  $0.08 \text{ h}^{-1}$ . The other spectrum coherencies give the same information. Hence, it will not be possible to know exactly which one is actually correlated to the residual in these two frequency ranges. The previous result is confirmed while looking at the spectral coherencies between the residual and the inputs (cf. Fig. 8). In fact, according to this figure, only direct solar radiation seems to be correlated to the residual in the low frequency range.

As it was noted previously, the fact that inputs are correlated to one another is a problem. To illustrate so, we perform the calculation of each input contribution to the residual variance. As the authors explain, the decomposition is sensitive to inputs ranking. Figs. 9 and 10 represent the error disaggregation on three different frequency ranges (also on the whole frequency range) for two different inputs

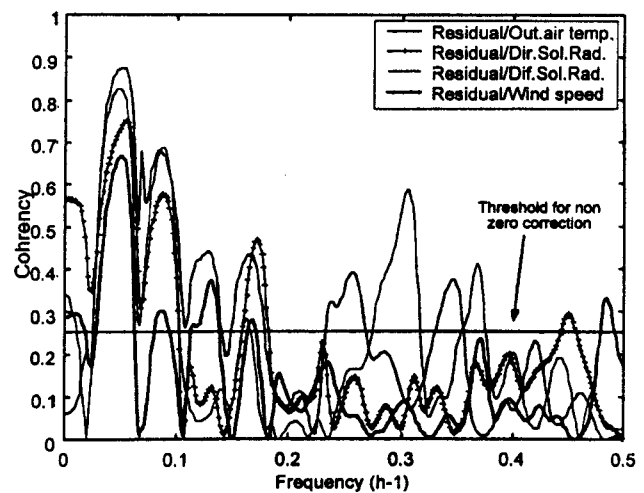


Fig. 8. Correlations between the residual and the inputs.



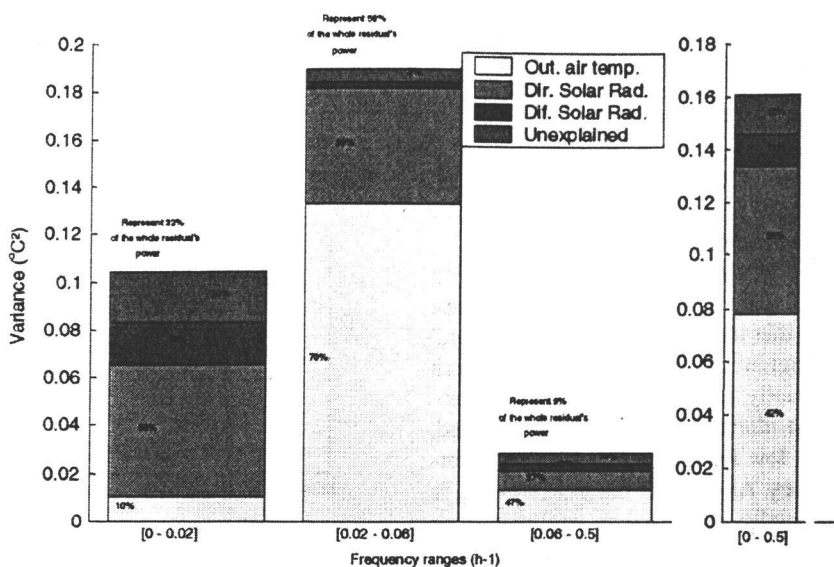


Fig. 9. Residual's variance decomposition taking outdoor air temperature as first input.

ranking. As it is expected, results are different specially on the second frequency range ( $0.02-0.06 h^{-1}$ ) which contains the  $1 day^{-1}$  harmonic. In this frequency range, it is impossible to identify the input(s) involved in the model disagreement. Yet, it seems that in low frequency range ( $0-0.02 h^{-1}$ ), direct solar radiation is correlated to the residual.

The unsuitability of classical spectral analysis is due to the fact that climatic data are non-stationary signals. In other words, this means even though they have the same spectral components, they may occur at different times [12]. Consequently, time-frequency analysis should bring more information about their dependence (in time and frequency simultaneously).

4.4.2. Time-frequency analysis: the short time Fourier transform

Two-dimensional analysis is a modern technique to extract information from signals. The interest of this kind of tools is that they simultaneously decompose a signal in time and frequency. One can guess that the information obtained are richer than those given in only spectral or time domain analysis. There are numerous techniques which can be regrouped into two families: time-frequency (for instance, the short time Fourier transform (STFT)) and time-scale (for instance, the wavelet transform). The aim of this paper is to apply the suitable technique to our data so we will not develop those tools deeply (see Ref. [13] for more details).

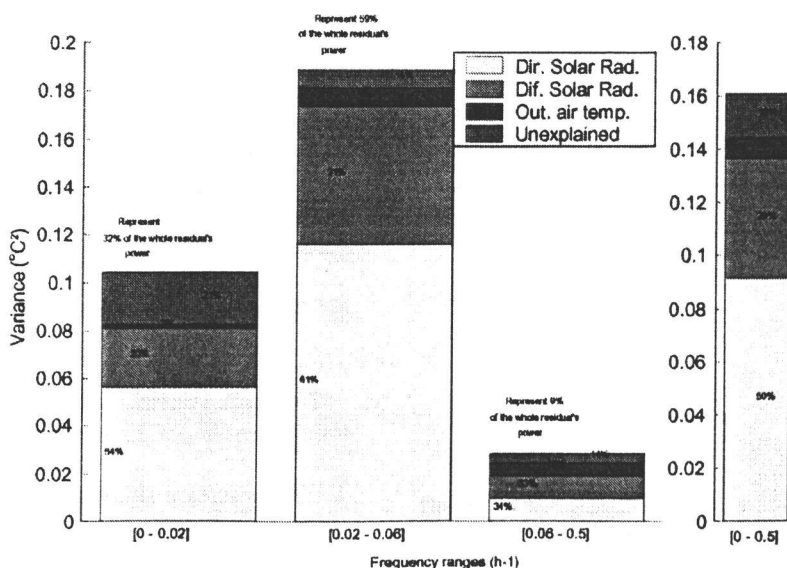


Fig. 10. Residual's variance decomposition taking direct solar radiation as first input.

The first and intuitive time–frequency tool is the STFT. It consists in performing Fourier spectrum through a short sliding window. Time localization is given approximately by the window's position on the signal. The STFT's squared magnitude representation is called a spectrogram. The information obtained with STFT is sufficient here as the spectral content of our data is poor. Indeed, wavelet transform is suitable for multiresolution signal.

To identify correlation around  $0.041 \text{ h}^{-1}$ , we are going to analyse the STFT of each data. In this study, the main idea consists in checking whether the spectrogram of the residual is similar to the spectrogram of one of the inputs (which means correlation). Actually, to obtain interesting spectrograms, data must be first filtered in low frequency. Indeed, the power of a signal in low frequency may conceal information in higher frequency. Anyway, in our case, filtering is justified as we are specially interested in analysing data around  $1 \text{ day}^{-1}$  harmonic ( $\sim 0.041 \text{ h}^{-1}$ ). For this purpose, a fourth order Butterworth filter (low-pass) is used to remove (in each signal) frequencies lower than  $0.02 \text{ h}^{-1}$ . Spectrograms were estimated with the toolbox developed by Auger et al. [14].

As we also mentioned above, there is a trade-off between time and frequency resolution depending on the window's width. For the present study, a Hanning's window of 49 *h*-width was chosen for reasonable compromise between temporal and spectral resolution.

Fig. 11 represents:

- the filtered residual in time (plot on the top of the figure);
- the power spectral density of the filtered residual (plot on the left);
- the spectrogram of the filtered residual (in the centre). The latter principally exhibits a  $1 \text{ day}^{-1}$  harmonic temporally localised around 50, 200, 250 and 325 h (cf. Fig. 11).

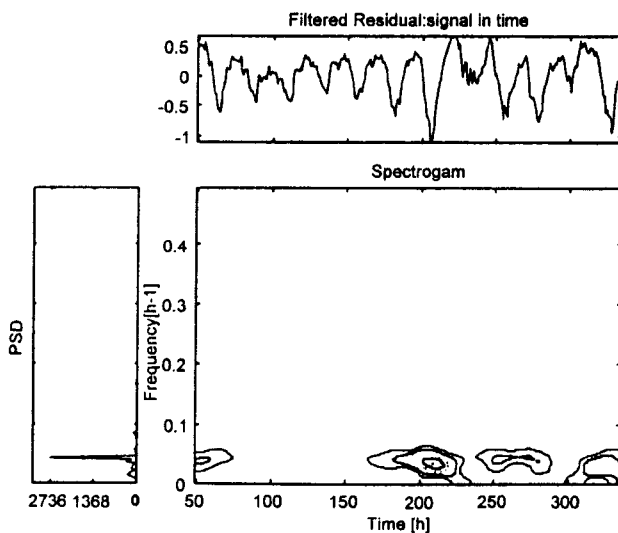


Fig. 11. Spectrogram of the filtered residual.

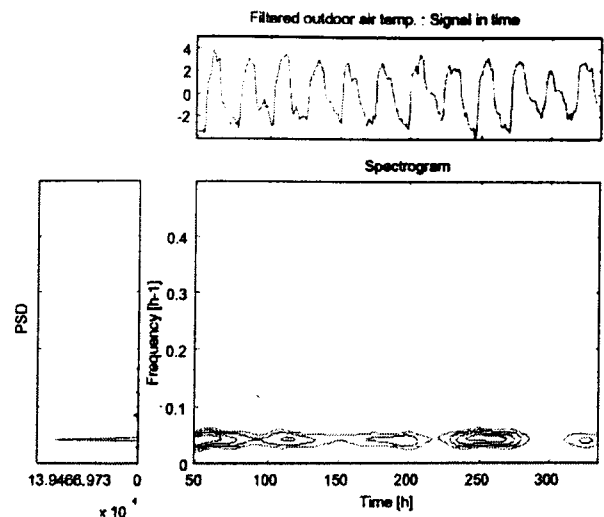


Fig. 12. Spectrogram of the filtered outdoor air temperature.

Spectrograms of climatic data show that time–frequency signature of the outdoor air temperature (Fig. 12) is very different of those of the solar radiation. Conversely to classical spectral analysis (see Section 4.4.1), it is now possible to distinguish outdoor air temperature from the other inputs. Spectrograms of diffuse and direct solar radiation (Figs. 13 and 14) illustrate the complementary of these two inputs. Consequently, it will be difficult to identify which one is really correlated to the residual. Comparison of the spectrograms clearly puts forward a correlation between outdoor air temperature and the residual around the 1 per day harmonic. So, we can conclude that the error origin comes from the way the model accounts for outdoor air temperature.

We have just identified the principal input involved in the model disagreement. The following step consists in finding the error origin which is another problem. One may suppose that the correlation between outdoor air temperature and residual is due to air infiltration in the cell test during experimentation. Yet, our knowledge of the experimental design leads us to reject this hypothesis. In Section 4.5, we verify whether the cause of disagreement between the model and measurement is due to the underestimation of the actual value of a parameter.

#### 4.5. Error origin and model improvement

##### 4.5.1. The methodology

To check whether the error origin comes from the unknown value of a parameter, we proceed as follows:

1. We perform a simulation by changing the value of the tested parameter.
2. We calculate the gaps between the new predicted indoor dry-air temperature and the one obtained with the base case model.

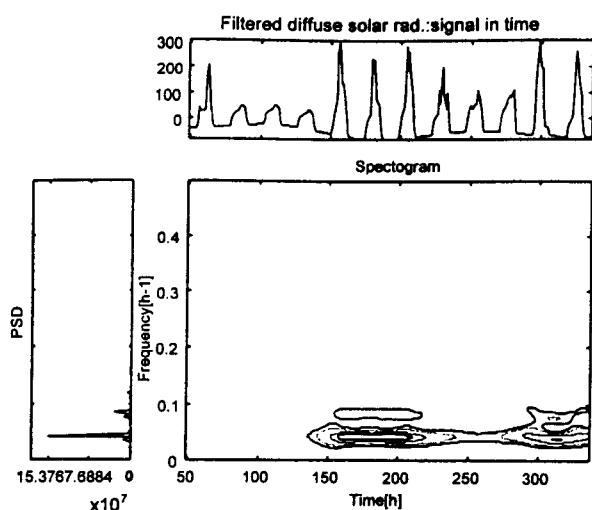


Fig. 13. Spectrogram of the filtered diffuse solar radiation.

3. We search for correlation between the residual (measurement–prediction) and the discrepancy.

Finally, once the parameter is identified, we search for the optimal value that gives a residual not correlated to the discrepancy calculated previously. Of course, this approach is correct only if the model is linear as regard to the parameter under consideration.

SA of the model showed that the most influential factors are principally the window's transmittance and thermal conductance of the polyurethane. As there is obviously no link between outdoor air temperature and transmittance, we start with the polyurethane's thermal properties. *Scatter plots* are used to analyse correlation between residual and the discrepancy due to the parameter variation.

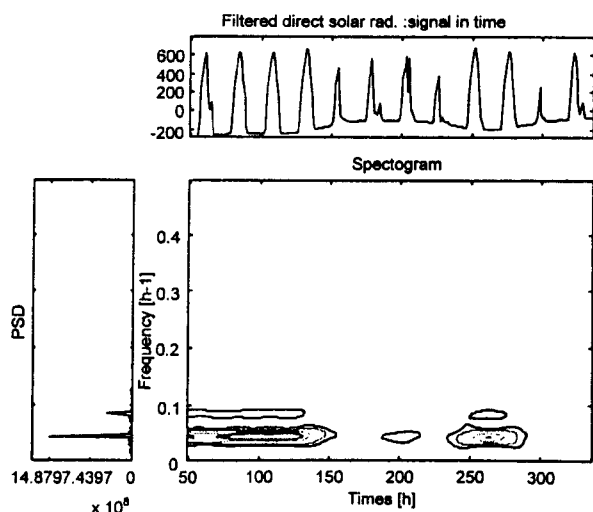


Fig. 14. Spectrogram of the filtered direct solar radiation.

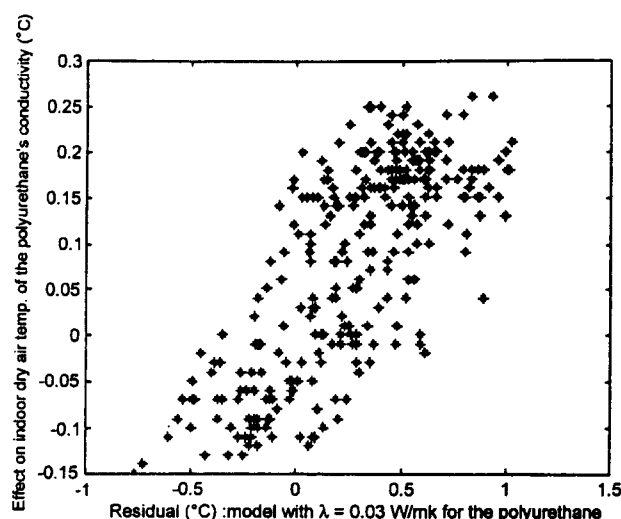


Fig. 15. The effect of the variation of the polyurethane's conductivity is correlated to the residual.

#### 4.5.2. Application

Fig. 15 clearly puts forward a linear correlation between the residual and the effect of the polyurethane conductivity (or thickness). This result proves that the error origin in the model comes from an underestimation of this parameter. In fact, as we explained above, the influence of the polyurethane's thickness and conductivity are indistinguishable. Consequently, the problem may also come from the actual value of the polyurethane's thickness. So, we have measured accurately the polyurethane's thickness (the cell test can be dismantled). Then, we search for the optimal value of the polyurethane's conductivity using the methodology described above and we found  $\lambda = 0.024 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Comparison to measurements indicates that the new model is better than the previous one (cf. Fig. 16). As the residual falls in the uncertainty intervals of measurements, the model was judged accurate enough. The statistical properties of the new residual are mean:  $0.028^\circ\text{C}$  and standard deviation:  $0.256^\circ\text{C}$ .

First, it must be noticed that the link between the thermal resistance (origin of error) and outdoor air temperature (the input correlated to the residual) is heat transfer by conduction.

The estimated value of the polyurethane's conductivity was first deemed doubtful. Indeed, according to our principal source [15], this material has a conductivity between  $0.03$  and  $0.045 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Fortunately, we found two other sources (cf. [16,17]) that confirm our estimation of this conductivity.

As measured data were used to improve the model, the latter cannot be considered as validated but as calibrated (see Ref. [18]). So, to corroborate our model's adequacy, a new set of measurements is necessary. We have recently carried out an experimentation on the same cell test and we present here the new confrontation.

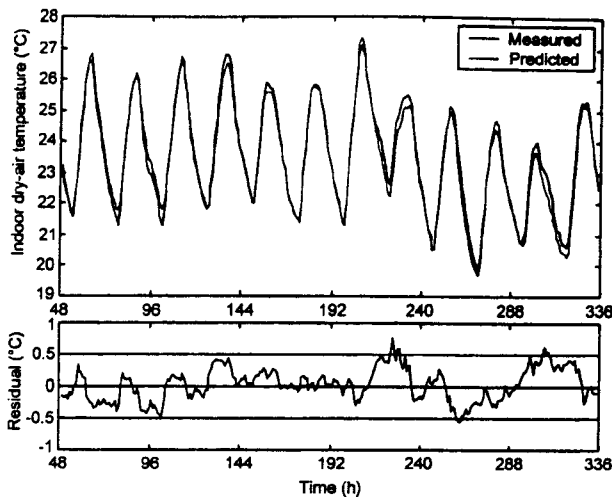


Fig. 16. Comparison between measurement and prediction of the new model.

### 5. Model's corroboration

To validate the previous model, we carried out a new experimentation that lasted 22 days. Yet, to ensure reproducibility of the results, the experimental set-up were different from the previous one. First, the cell test was moved to a different place (from the north to the south of the island). Moreover, the experimentation was performed during the austral summer (instead of winter) and the data were sampled at 15 min (instead of 1 h). At last, the window was turned opaque to keep solar radiation from getting in the room.

#### 5.1. The new confrontation

We use the model identified previously but because of the experimentation, we change three things:

- a new component is used to represent the opaque window;
- the albedo is changed to 0.3 (instead of 0.2) because of the site configuration;
- instead of the adiabatic condition under the ground, the temperature was assumed equal to the one measured at 10 cm in the ground (see Fig. 17) under the cell test.

The model is in good agreement with measurement as the residual belongs to  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  most of the time (Fig. 18). Its mean and standard deviation are  $-0.012$  and  $0.340^\circ\text{C}$ , respectively.

#### 5.2. Validation test

We apply a statistical test to check whether the predicted indoor air temperature and measurement have the same mean and variance. We choose the one proposed by Kleijnen et al. [19]. This test consists in regressing the difference

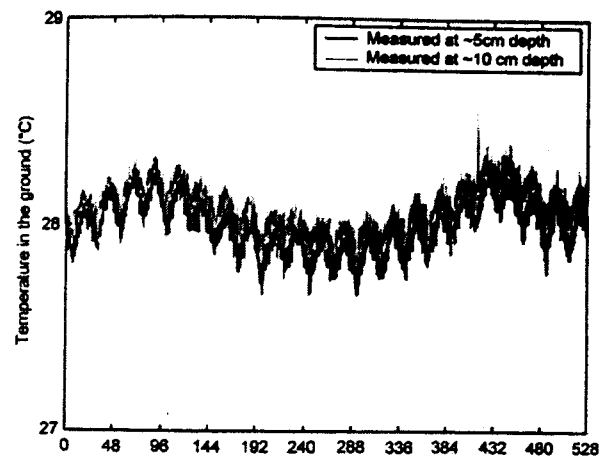


Fig. 17. Temperatures measured in the ground at different depths.

between measured and predicted data (residual) on their sum:

$$D_i = \gamma_0 + \gamma_1 Q_i$$

where  $D_i$  is the difference between measured and predicted indoor air temperature,  $Q_i$  their sum, and  $\gamma_0$  and  $\gamma_1$  the regression coefficients.

The test consists in verifying that  $\gamma_0=0$  and  $\gamma_1=0$  (null-hypothesis,  $H_0$ ). To test this joint hypothesis  $H_0$  simultaneously, according that measured and predicted data are identically and independently normally distributed, the full and reduced sum of square errors must be evaluated:

$$\text{SSE}_{\text{full}} = \sum_{i=1}^n D_i - D_i^*, \quad \text{SSE}_{\text{reduced}} = \sum_{i=1}^n D_i$$

where  $D_i^* = C_0 + C_1 Q_i$  and  $C_0$ ,  $C_1$  are the ordinary least square estimators of the previous regression.

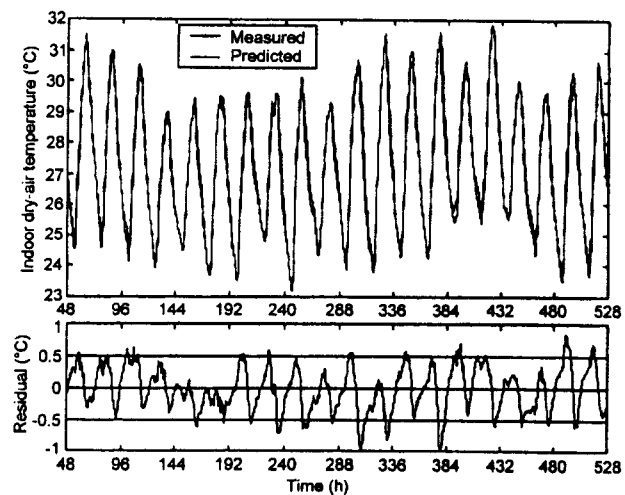


Fig. 18. Comparison of measured and predicted data of the optimal model with a new set of measurements.

It can be shown that  $F_{2,n-2}$  defined by  $F_{2,n-2} = \frac{[\frac{1}{2}(n-2)][SSE_{\text{reduced}} - SSE_{\text{full}}]}{SSE_{\text{full}}}$  is an  $F$ -statistic with  $(2, n-2)$  degrees of freedom. Application of this test to our data ( $n = 1920$ , sampling at  $\frac{1}{4}$  h during 20 days) leads us to determine:

$$\frac{[\frac{1}{2}(n-2)][SSE_{\text{reduced}} - SSE_{\text{full}}]}{SSE_{\text{full}}} = 3.21$$

As  $\Pr(F_{2,n-2} > 3.21) \approx 0.04$ , we accept the null-hypothesis  $H_0$  with the probability of 4% to be wrong and we conclude that the model is *valid*.

## 6. Conclusion

We have just performed an empirical validation of a cell test's thermal model. The fact that our first model was not accurate enough turned the validation problem into an inverse problem. In validation terminology, this is called model calibration. Then, the new model predictions were corroborated with a new set of measurements. Calibration requires SA and research of the inputs which are not correctly taken into account by the model. For the latter, we demonstrated in our study that a time–frequency analysis tool called STFT is suitable to exhibit correlation between residual and inputs. SA also helped to identify the origin of discrepancy between measurement and the model.

The actual error came from an underestimation of the thermal conductivity of the polyurethane. The latter result also demonstrates how it is important to have reliable documentation on data-sets of thermophysical properties of building materials. To corroborate the adequacy of the model, the latter was confronted to a second set of measurements. The fact that experimental set-up were different from the previous one, ensured reproducibility of the model in the studied configurations (i.e. when only diffuse solar radiation passes through the window). Next empirical validation works will focus on the ability of the program to take into account direct solar gain in a room and to model the effect of ventilation on indoor air temperature.

## Acknowledgements

The financial contribution of *Conseil Régional de La Réunion* and of Réunion Island delegation of ADEME (Agence Départementale de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) to this study is gratefully acknowledged.

## References

- [1] H. Boyer, J.P. Chabriot, B. Grondin-Perez, C. Tourrand, J. Brau, Thermal building simulation and computer generation of nodal models, *Building Environ.* 31 (3) (1996) 207–214.
- [2] T. Soubdhan, T.A. Mara, H. Boyer, A. Younès, Use of BESTEST procedure to improve a building thermal simulation program, in: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Part III*, Brighton, UK, July 1–7, 2000, pp. 1800–1803.
- [3] F. Garde, Validation et développement d'un modèle thermo-aérodynamique de bâtiments en climatisation passive et active, Ph.D. Thesis Sci., University of La Réunion Island, 1997.
- [4] R.J. Cole, N.S. Sturrock, The convective heat exchange at the external surface of buildings, *Building Environ.* 12 (1977) 207–214.
- [5] K. Lomas, H. Eppel, Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, *Energy and Buildings* 19 (1992) 21–44.
- [6] J.M. Fürbringer, C.A. Roulet, Comparison and combination of factorial and Monte Carlo design in sensitivity analysis, *Building Environ.* 30 (4) (1995) 505–519.
- [7] N. Rahni, N. Ramdani, Y. Candau, G. Guyon, Application of group screening to dynamic building energy simulation models, *J. Statist. Comput. Simul.* 57 (1997) 285–304.
- [8] S. Ezzamari, N. Ramdani, Y. Candau, Analyse de sensibilité de la réponse fréquentielle d'un modèle en thermique du bâtiment, in: *Proceedings of the SFT 2000 Congress*, Lyon, France, pp. 723–728.
- [9] T.A. Mara, H. Boyer, F. Garde, L. Adelard, Présentation et application d'une technique d'analyse de sensibilité en thermique du bâtiment, in: *Proceedings of the SFT 2000 Congress*, Lyon, France, pp. 795–800.
- [10] E. Palomo, J. Marco, H. Madsen, Methods to compare measurements and simulations, in: *Proceedings of the IBPSA Conference on Building Simulation'91*, Nice, France, August 20–22, pp. 570–577.
- [11] N. Ramdani, Y. Candau, S. Dautin, et al., How to improve building thermal simulation programs by use of spectral analysis, *Energy and Buildings* 25 (1997) 223–242.
- [12] R. Rabenstein, T. Bartosch, Wavelets analysis of meteorological data, in: *Proceedings of the Eurotherm Congress*, 1996.
- [13] B. Torrèsani, *Analyse Continue par Ondelettes*, CNRS Editions, Paris, 1995.
- [14] F. Auger, P. Flandrin, P. Gonçalvès, O. Lemoine, Time–frequency toolbox for use with MATLAB, user's manual, edited by French CNRS, 1997.
- [15] M. Abdessalam, *Climatiser dans les DOM, Guide Pratique pour le Tertiaire*, Vol. 4, edited by EDF and French ADEME, March 1998.
- [16] Polyurethane foam (special issue), *J. Therm. Insul. Building Envelopes* 21 (January 1998), Technomic Publishing Co.
- [17] J.A. Clarke, P.P. Yaneske, A.A. Pinney, The harmonisation of thermal properties of building materials, Technical Note 91/6, BEPAC, March 1991.
- [18] J.P.C. Kleijnen, Case study statistical validation of simulation models, *Eur. J. Oper. Res.* 87 (1995) 21–34.
- [19] J.P.C. Kleijnen, B. Bettonvil, W.V. Groenendaal, Validation of trace-driven simulation models: a novel regression test, *Mgmt. Sci.* 44 (6) (1998) 812–819.

# Implementation and Experimental Validation of Passive Design Principles used in Naturally Ventilated Buildings under Humid Tropical Climates.

**FRANÇOIS GARDE**, *Assistant Professor, Laboratory of Industrial Engineering, University of Reunion Island, France*

**THIERRY MARA**, *Research Assistant, Laboratory of Industrial Engineering, University of Reunion Island, France*

**FRANCK LUCAS**, *PhD Student, Laboratory of Industrial Engineering, University of Reunion Island, France*

**FRÉDÉRIC MIRANVILLE**, *PhD Student, Laboratory of Industrial Engineering, University of Reunion Island, France*

**LAETITIA ADELARD**, *Assistant Professor, Laboratory of Industrial Engineering, University of Reunion Island, France*

## ABSTRACT

This paper deals with a global approach in the passive design of naturally ventilated buildings in the French overseas territories, which involved all the participants in the building process from the architect and the building owner to the building physicists and the climate engineers. The design and sizing of the main architectural component has been assessed with a validated thermal and airflow building simulation software. The optimal technical specifications have been edited in a reference document, which has been used to build over 800 new pilot dwellings through the years 1997-2000 in Reunion Island and in Guadeloupe. An experimental monitoring and a sociological study were undertaken in the first ECODOM dwellings in 1998 and 1999 to have a feedback of the impact of the passive cooling strategies on thermal comfort of occupants leading to modify specifications if necessary. The paper presents all the methodology used for the elaboration of the ECODOM standard, from the simulations to the experimental feedback. In addition, the paper points out that with simple and appropriate tools, architects and building physicists can work together at the early stage of the project and thus optimise all the aspects of the indoor environment.

## I. INTRODUCTION

To face the growing energy problem in the tropical islands (restricted means of production and growing demography), a DSM initiative was launched in 1995 in the new housing sector in the French islands of Guadeloupe and La Reunion through a partnership between several public and private partners (the French Public Utility EDF, the University of Reunion Island,

low cost housing companies, architects, energy consultants, etc...). The aim was to set up standards to improve thermal and airflow design of new residential buildings in tropical climates and thus to limit the use of energy consuming air conditioning appliances.

Of course, the success of such an operation relies partly on a financial incentive for each new dwelling but mainly on the use of the appropriate tool (for example, software, documentation, etc.) that will be used at the early stage of the project by the different people involved in the design of the new buildings. As Glicksman points out in (Glicksman 2000), to bring new concepts from research to fruition, the architecture and engineer must collaborate from the inception of a new development project. For example, if a building is to be designed so that natural ventilation can provide comfort for a substantial portion of the cooling season without the use of mechanical refrigeration, the building must be properly sited relative to prevailing winds. The interior must also be designed to provide low resistance pathways for airflow and widespread circulation of the ventilation flow. Glicksman also reminds us that appropriate solutions must be simple and easy to produce relying on local skills.

Existing bibliography on passive thermal design of buildings is extremely rich and varied. Publications often focus either on the optimization of one component of building (Bansal et al. 1992) or on the presentation of a performing bio-climatic project (Filippin et al 1998) or on global approach of building with a description of the passive solar strategies to implement in it (Malama and Sharples 1996), (Garg 1991), (Mathews and van Wyk 1996). These publications often have an obvious interest for building physicists but cannot be easily applicable in a national overall program to generalize improvement of thermal performances of buildings : because scientific preoccupations are often far from economical building reality. In addition architects and engineers lack of time to learn to use scientific tools and to read research reports in the fields of thermal design of building. Thus, to bridge the gap between building designers and building physicists, a simple, straightforward and pedagogical language must be spoken. Miro has recently raised this issue in (Miro and Kox 2000) : to guarantee the success of sustainable design of buildings, buildings physicists can play a crucial role in environmental design teams by encouraging the development of more rigorous assessment tools that are appropriate, practical and friendly. Finally, Schuler, who has been involved in numerous low energy building projects, emphasizes the importance of the mandatory co-operation of architects and engineer at the very early stage of the project (Schuler and Voit 1995).

## 2. METHODOLOGY

The methodology used for the set-up of the ECODOM standard consisted of three main phases from 1994 to the present time, which are :

1. The elaboration of the simple and pedagogical rules (from 1994 to 1997)
2. The implementation of the ECODOM specifications in the new housing projects (from 1997 to now)
3. The validation of the ECODOM specifications thanks to monitoring in the non-occupied and occupied dwellings (1998 and 1999 summer period).

### 2.1 The development of the ECODOM reference document

In the specialists' own opinion, the best way to work together was to produce a simple document with less than 30 pages explaining the different passive solutions that will be taken into account.

First of all, the specifications that have to be considered in the building by taking into account the energetic, climatic and social contexts, were identified.

A network was set up since 1995 between the ECODOM partners (ministry of housing, architects, the French authority for environment and energy conservation, energy consultants, the University of Reunion Island, low cost housing companies, public utilities...). This network of partners has been consulted after at each step of the ECODOM project.

We run an important number of simulations on each specification (solar protection of the roof for example) on typical local dwellings (light and heavy structure). The simulation were carried out with the use of the thermal and airflow software CODYRUN (Boyer 1998). The simulation results have led to the definition of efficient passive technical specifications for each part comprising the building envelope. The simulations, their analysis and synthetic results have been presented in (Garde et al. 1999)

The ECODOM reference document containing all the passive cooling solutions was edited in 1997 after numerous in and outs among the different partners for taking into account the pedagogical aspects of the document (Célaire and Jourdan 1997).

## 2.2 Implementation and validation

Once the document was made, the next step was obviously to implement the standard to new dwellings. 800 pilot dwellings were built according to the ECODOM specifications throughout the years 1996-2000 .

A technical and sociological validation period was launched in the first ECODOM operations for two years thanks to the financial help of the French Ministry of Housing. The two first ECODOM projects were instrumented during the 98' and 99' summer seasons. The name of these projects are "La Trinité" and "La Découverte". The aim was to have an experimental feed back of the thermal and airflow performances of the ECODOM dwellings and of the thermal sensation of the tenants. That's why a sociological survey was coupled with the technical monitoring.

The sections 4, 5 and 6 will describe the implementation of the specifications, the instrumentation and the results. The main results have been presented in three research reports (Garde et al. 1998), (Garde et al.. 2000a) and (Garde et al. 2000b).

Then, thanks to the experimental feed back, the main objectives are to expand this pilot phase to the residential sector on a much broader scale (with the objective of 2000 new dwellings per year) and complete similar global energy efficiency projects in refurbishment projects.

## 3. REMINDER OF SOME OF SPECIFICATIONS OF THE ECODOM STANDARD

The ECODOM reference document contains five main sections, corresponding to a specific part of the building. These sections concern :

1. The location on site (vegetation around the building);
2. The solar protection of the building (roof, walls, windows);
3. The natural ventilation (exploitation of trade winds, and optimized ratio of inside/outside air-permeability of dwelling envelope, use of indoor louvers) or mechanical ventilation (ceiling fans);
4. The domestic hot water production (solar water heaters, efficient gas water heaters or properly designed off-peak hours servo-controlled high efficiency storage electric water heaters);



5. As an option, high efficiency intermittent air conditioning systems for bedrooms (air tightness of rooms, efficient components, controls,...).

For each section, a choice of technical solutions is proposed to guide the architect or the climate engineer in the design of the building without using a dynamic simulation tool.

For instance, as for the insulation thickness required for a red coloured roof, Figure 1 shows that the insulation needed is 8 cm for polystyrene type insulation.

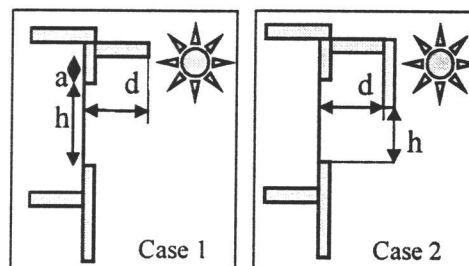
Table 1 : Insulation required as a function of the roof shape and the roof colour (Célaire and Jourdan 1997)

| <i>Insulated simple roofs</i> |  |   |
|-------------------------------|--|---|
| Roof colour                   | Polystyrene type insulation<br>$\lambda = 0.041 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ | Polyurethane type insulation<br>$\lambda = 0.029 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| light ( $\alpha = 0.4$ )      | 5 cm   | 4 cm  |
| medium ( $\alpha=0.6$ )       | 8 cm   | 6 cm  |
| dark ( $\alpha = 0.8$ )       | 10 cm  | 8 cm  |

As for the solar protection of windows, it is recommended that all windows must be protected by some kind of window shading system, such as horizontal overhangs and other shading devices such as venetian blinds or opaque, mobile louvers. If the architect decides to use horizontal overhangs, Table 1 gives geometric characteristics of overhangs in relation to the orientation of the window.

Table 2: Values of  $d/(2a+h)$  (case 1), or  $d/h$  (case 2)

|                | Orientation of windows |       |      |       |
|----------------|------------------------|-------|------|-------|
|                | East                   | South | West | North |
| Reunion Island | 0.8                    | 0.3   | 1    | 0.6   |
| Guadeloupe     | 0.8                    | 0.6   | 1    | 0.3   |



As for natural ventilation, dwellings must have layouts allowing for effective cross ventilation of all rooms.

At each level or floor, there should exist openings in each main room, on at least two opposite facades (main rooms being bedrooms and the living room, the dining room and other living spaces). Interior layout should also be designed to allow outside air to flow through main rooms from one facade to the other through halls, corridors, doors and other internal openings in room partitions. The first step is to calculate the mean porosity of two opposite facades of dwelling. Then, the internal and external porosities required by ECODOM standards are at least 25% of the mean.

As for domestic hot water, dwellings are equipped with domestic hot water heating systems which are energy efficient, long-lasting and economic. Water heating can be solar, electric or gas

Implementation and experimental validation of passive design principles used  
in naturally ventilated buildings under humid tropical climates.

Schuler M. and Voit P.. 1995. Building simulation in application : Development of  
concepts of low energy buildings by co-operation of architect and engineer., *in : Proceedings  
of International Symposium of Passive Cooling of Buildings*, pp. 303-309, Athens, Greece.

Natural ventilation showed itself effective in the tested flats except at night in the case of very light night breezes when an overheating effect of 1°C was observed compared to the outside temperature. Also, the ECODOM percentage of openings of 25 % is a required minimum.

Finally, the sociological study showed that the tenants were globally satisfied with their flat as far as the thermal aspects are concerned. However, dissatisfaction resulted from the bad acoustic design of the flats.

## 8. REFERENCES

- Bansal, N.K, Garg S.N., and Kothari S. 1992. Effect of Exterior Surface Color on the Thermal Performance of Buildings. *Building and Environment*, Vol. 27, pp. 31-37.
- Boyer, H., Garde, F., Gatina, J.C., Brau, J.. 1998. A multi model approach of thermal building simulation for design and research approach, *Energy and Building*, Vol.28, pp.71-78.
- Célaire, R., Jourdan O. 1997. Opération expérimentale ECODOM. Prescriptions techniques.. Antilles et les bas de La Réunion. Document de référence ECODOM 32 p.
- Filippin C., Beascochea A., Esteves A., De Rosa C., Cortegoso L. and Estelrich D. (1998). A passive solar building for ecological research in Argentina : The first two years experience. *Solar Energy*. Vol. 63, n°2, pp.105-115.
- Garde F., Boyer H., Gatina J.C. 1999. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in french tropical island buildings. *Building and Environment*. Vol.34, pp.71-83.
- Garde, F., Adelard, L., Mara, T. 2000a. Evaluation technique et sociologique de l'opération expérimentale ECODOM à l'Ile de La Réunion. *Note de synthèse LGI/ IPSOS O.I. Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion*. 20 p.
- Garde, F., Adelard, L., Mara, T., Poudroux, P. and Boyer H. 2000b. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. *Rapport intermédiaire : opération « La Découverte » Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion*, 60p.
- Garde, F., Pignolet-Tardan, F, Mara, T. and Boyer, H. 1998. Evaluation technique de l'opération expérimentale ECODOM. *Rapport intermédiaire : opération « La Trinité » Convention d'étude Secteur Pilote Innovation Outre Mer, DDE Réunion*, 82 p.
- Garde, F., Adelard, L., Boyer, H. and Célaire, R. 1997. Demand Side Management in Tropical Island Buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in Buildings. *Proceedings of CLIMA 2000*, Brussels, Belgium.
- Garg. N. K. 1991. Passive solar options for thermal comfort in building envelopes – An assessment. *Solar energy*, Vol. 47, n°6, pp. 437-441.
- Glicksman, L. 2000. The challenge of Sustainable, "Green buildings", *Journal of HVAC&Research*, Vol. 6, n°3, pp. 211-212.
- Malama A. and Sharples S. (1996). Thermal and Economic Implications of Passive Cooling Strategies in Low-Cost Housing in Tropical Upland Climates. *Architectural Science Review*, Vol. 39, pp.95-105.
- Mathews E.H. and van Wyk. S.L. 1996. Energy efficiency of formal low-cost housing in South Africa's Gauteng region, *Energy and Buildings* vol. 24, pp. 117-123.
- Miro, C. R., Cox, J.E. 2000. Sustainable Design and the High performance Building, *ASHRAE Journal*, vol.42, n°8, pp.24.

We observed that those rooms which are not under the roof and also naturally well ventilated have the same global thermal and airflow behaviour, We are on average 10 % outside the comfort zone.

The room (bedroom 3) under the roof is very hot. The distribution of the points on the psychometric chart is spread over the axis of the resultant temperatures. Although this room is naturally ventilated and is often used by the tenant, we are outside the comfort zone 40% of the time. It is not in fact the way of living that influences the thermal behaviour of the room, but rather a problem of insufficient heat insulation coupled with an insufficient cross ventilation.

### 6.6 The sociological survey

We present herein the main results of the sociological survey. The results often confirm some of the conclusions of the technical survey.

The inhabitants of "la Trinité" suffer from the heat in the bedrooms under the roof. As for the solar protection of windows, occupants of "La Trinité" complain of the lack of window solar protection. Occupants of "La Découverte" find that the indoor air temperature is high in the bedrooms located on the eastern side.

As for the natural ventilation, the tenants appreciate the cross ventilation despite the dissatisfaction resulting from the bad acoustic design of the flats (only for the tenants of "La Trinité"). Indeed, one of the major problems of design in tropical climates is the conflict of thermal and acoustic design. On the one hand, the dwelling must be kept open for thermal comfort, but on the other hand, acoustic comfort is achieved by closing the windows.

People often regret the possibilities of adjusting the airflow outside the dwelling with mobile louvers (bedrooms were equipped with "classic" windows).

Furhter, the results of the sociological survey have been linked to the results of the technical survey. Both studies will allow the building physicists, the engineers and the architects to improve the thermal and airflow design of buildings by proposing new superior products but by taking into account people's way of life.

## 7. CONCLUSION

The methodology used for developing ECODOM standards, from simulations to experimental results, has been presented.

The whole study led to a pedagogical reference document defining efficient passive solar cooling strategies and specifications for each component of the dwelling outer framework and likewise minimal porosity ratios to optimise natural ventilation. Dwellings to be constructed according to ECODOM standards should follow these specifications. ECODOM participants (architects, designers, engineers, building physicists, etc.) now speak the same "language" by using the reference ECODOM document.

Monitoring has been set up for the first ECODOM dwellings constructed in order to experimentally validate the impact of passive cooling specifications on the comfort of occupants. This experimental work has allowed real scale feed-back.

The solar protection of the roof remains one of the main points in the thermal design of buildings in a tropical climate. We were able to show some faults of the implemented insulation in the experimental projects leading to important overheating. It is also necessary to maintain the specifications of Table 1 concerning the minimum thickness of insulation needed.

Figure 11 shows that for both dwelling, the indoor air temperature remains  $1,5^{\circ}\text{C}$  below the outdoor temperature during the day and  $1^{\circ}\text{C}$  above during the night. This is quite a good result because the main objective of the building design in tropical climates is to avoid the overheating of the indoor temperature by keeping it at least below the outdoor temperature.

The effect of cross ventilation was demonstrated by closing one of the opposite openings of the C2T3 living room the 29<sup>th</sup> of January. The comparison of the indoor air temperature show a gap of more than  $1.5^{\circ}\text{C}$  between the cross-ventilated dwelling and the other one.

### 6.5 Thermal Comfort during occupied period (project "La Trinité")

The results presented here were obtained in an occupied flat of the operation «La Trinité». The period of instrumentation was two months (in March and April, 1998). The instrumented flat was on a split level. The first level included two bedrooms (named bedroom 1 and bedroom 2), the kitchen and the living room. The upper level under the roof included only a third bedroom (bedroom 3). This flat failed the ECODOM specifications in two respects : the first concerned the insulation of the roof which was only 5 cm thick whereas ECODOM requires 10 cm (the roof was grey in colour). The second concerned the ventilation of the bedroom under the roof : the percentage of ventilation was significantly lower than the percentage required by ECODOM (1 square metre instead of 2 square metres).

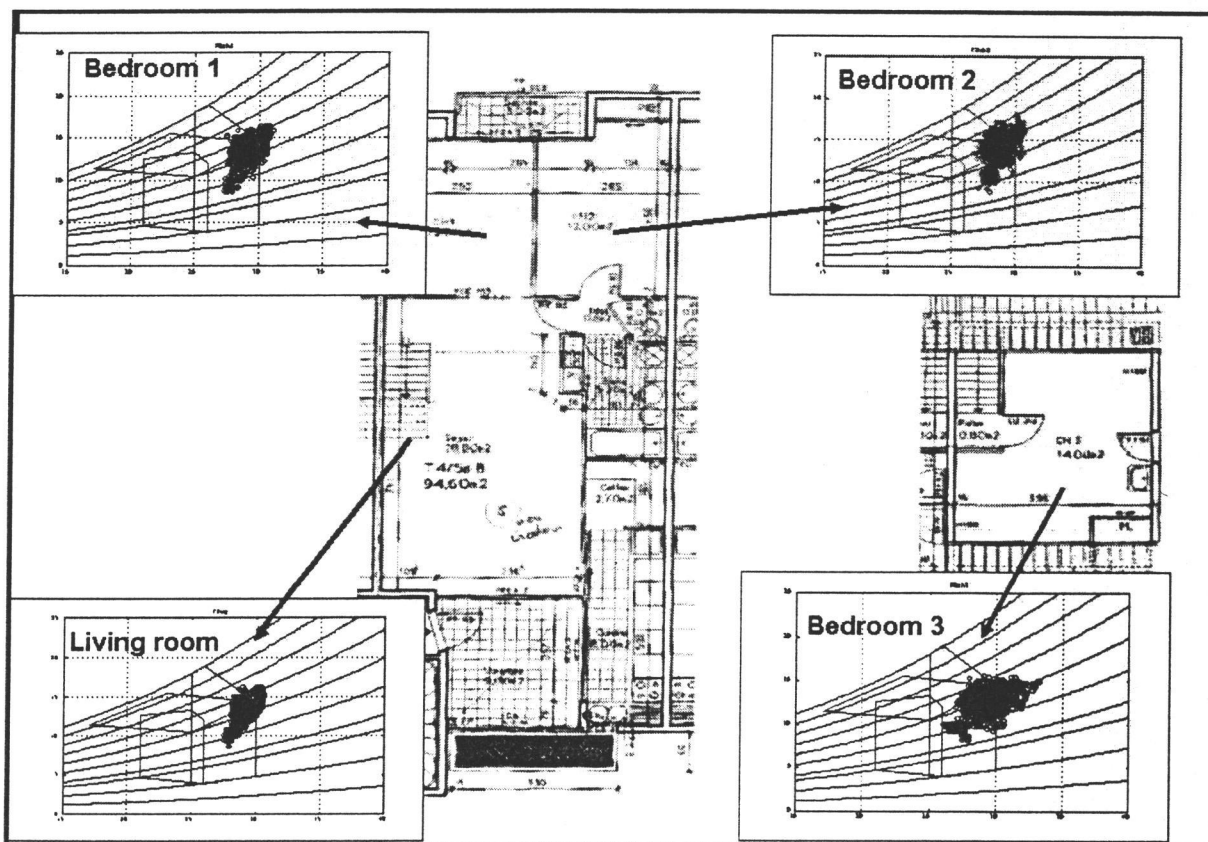


Figure 12 : Temperature/humidity reading pairs of the different rooms of an occupied flat – "La Trinité"

Figure 12 shows the set of temperature/humidity readings over the period of instrumentation for the rooms on the first level and for the room under the roof (bedroom 3).

### 6.4 Natural ventilation

Cross ventilation is of prime importance in humid tropical climates as well as the solar protection of the roof..

As for these two projects, natural ventilation of dwellings is globally efficient during the hot and humid season. The natural ventilation is better in the country site of “La Découverte” rather than the urban site of “La Trinité”. As for “La Découverte”, most of the temperature/humidity readings pairs inside the dwellings remain inside the comfort zone for a velocity of  $1 \text{ m.s}^{-1}$  although they are on average 10 % outside the comfort zone for “La Trinité”.

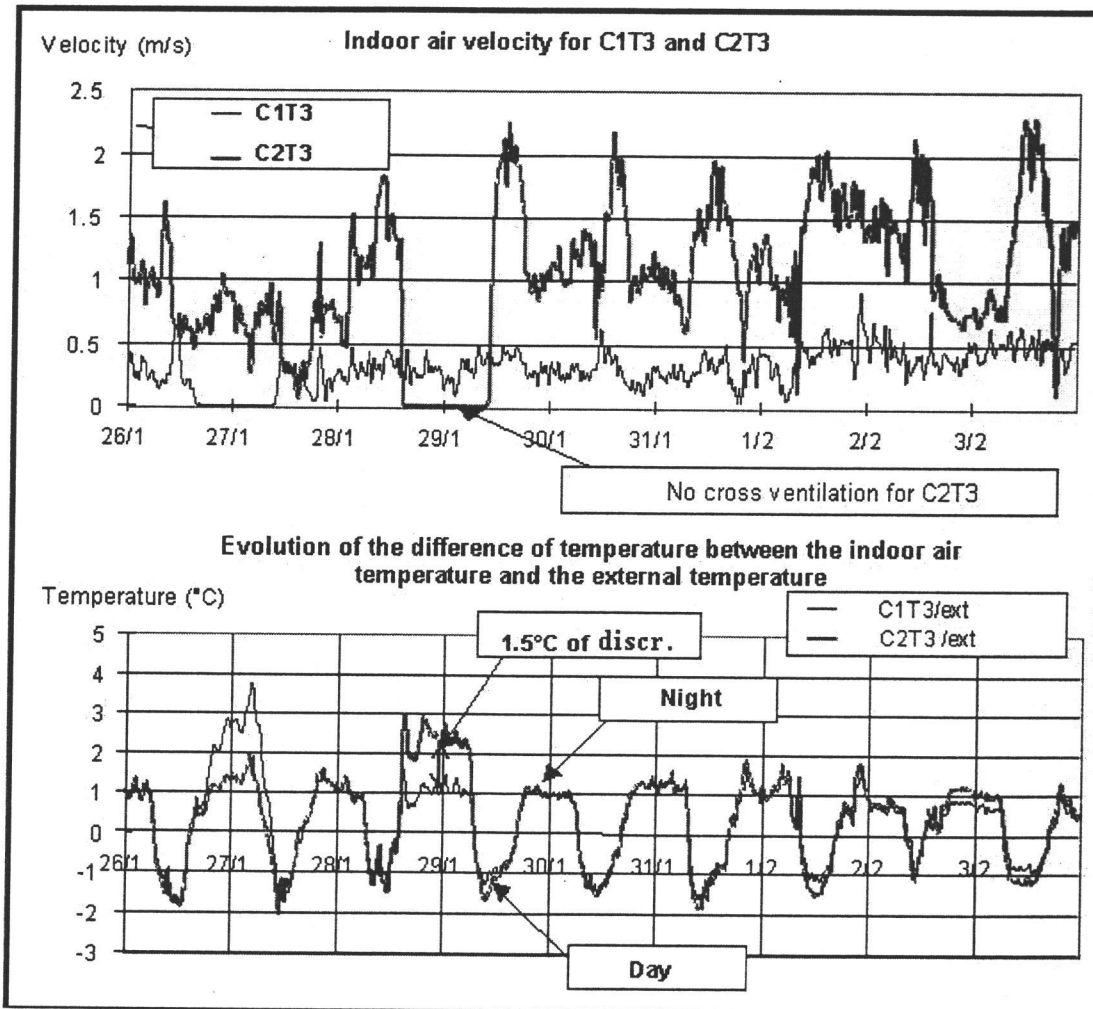


Figure 11 : Evolution of the indoor air velocity and the simultaneous difference of temperature between air inside and air outside - (C1T3 and C2T3 dwellings)

If we look at the air velocity inside the two dwellings of “La Découverte” (C1T3 and C2T3) both open at their maximum openings, we can notice that C2T3 is better ventilated than C1T3 (see Figure 11). This can be explained by the three upwind buildings which stop the effects of trade winds on the C1T3 building. Meanwhile, the indoor average velocity is about  $1 \text{ m.s}^{-1}$  for C2T3 and  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  for C1T3. Thanks to these values, the comfort conditions are reached 100 % of the time. These results were confirmed by the inhabitants during the sociological survey.

## 6.2 Solar protection of windows

As for “La Découverte”, the poor solar protection of the eastern and southern windows was highlighted by the measurements.

Figure 10 shows the evolution of the globe temperature discrepancies between the front bedroom and the back bedroom of the T4R1 and T4 RdC dwellings during the month of April 99. The sun remains on the north side all day long. The analysis of Figure 10 shows that the overheating comes from the front bedroom (facing north) with more than 2.5°C at peak time.

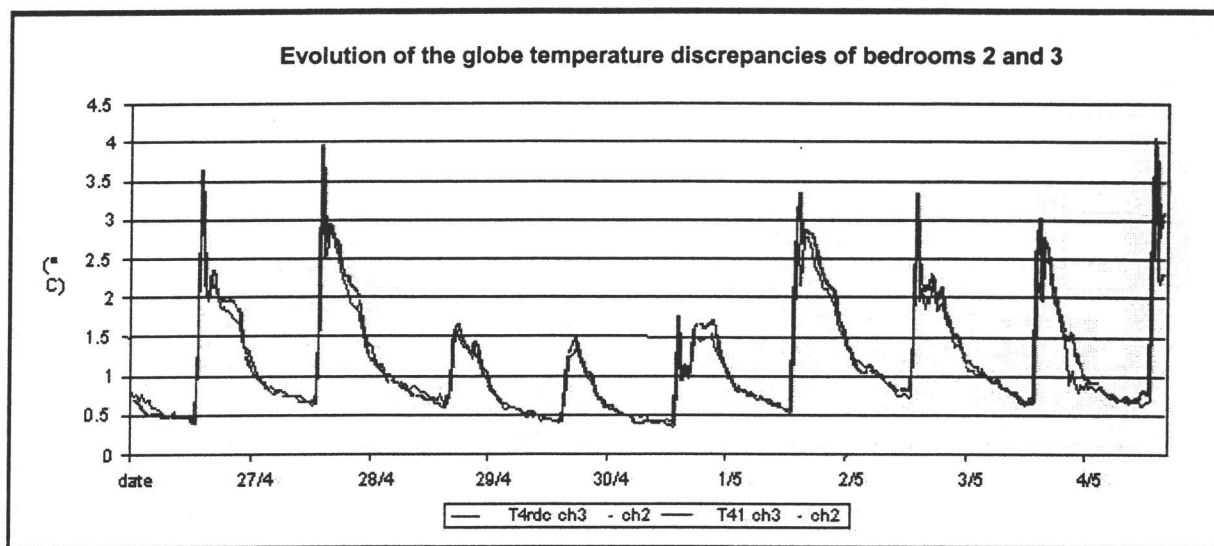


Figure 10 : Evolution of the discrepancies between the globe temperatures of the front and back bedrooms (T4RdC and T4R1)

The same evolution was noticed during the month of December for the C1T3 and C2T3 dwellings. During this period, the position of the sun is more southerly and we noticed an overheating in the back bedroom of more than 1°C because of the lack of solar protection of windows (see Figure 7 for the position of the rooms).

As for La Trinité, the bad design of the solar protection of windows induced a measured overheating of more than 3°C (Garde et al. 1998).

## 6.3 Solar protection of walls

The impact of solar protection of walls is of less importance than the the solar protection of windows. Therefore, if a project is too expensive, the preferred initial source of economy is the wall protection.

Nevertheless, the experimental feed back in (Garde et al.1998) for “La Trinité” highlighted that an overheating of 2°C was observed in rooms with coloured concrete walls exposed to the solar radiations compared to rooms with no walls exposed.

As for “La Découverte”, no overheating was observed thanks to the good overall thermal protection of walls (insulation of the eastern and western gables and balconies on the northern facades).

In our opinion, the facades that still require a solar protection would be primarily the northern and the western facades, then secondly, the eastern and the southern facades.

## 6. RESULTS AND DISCUSSION

The following sub-sections summarise the main conclusions of (Garde et al. 2000b), (Garde et al. 1998).

### 6.1 Solar protection of the roof

The insulation of the roof is a first priority in solar protection within the framework of the ECODOM process. To demonstrate the influence of the roof, we have instrumented two identical apartments (the same as the one figure 8) but with one under the roof and the other one at a lower level. In this case, when the two apartments are closed, the gap between the indoor resultant temperatures is only due to the energetic contribution of the roof.

Figures 10 and 11 show respectively the solar radiation during the period of January 99' and the evolution of the indoor resultant temperatures in the two apartments. A consistent 1°C to 1.5°C offset is observed between the two apartments during the whole period of measurement. The same result was found for the two measurement campaigns ("La Trinité" and "La Découverte") : a flat under the roof with good insulation corresponding to ECODOM always has a resultant temperature above 1°C to 1.5°C higher than the flats which are not under the roof. With a poorly designed roof, differences of more than 3°C are observed. This type of measurements confirms the major importance of good insulation of the roof in tropical climate.

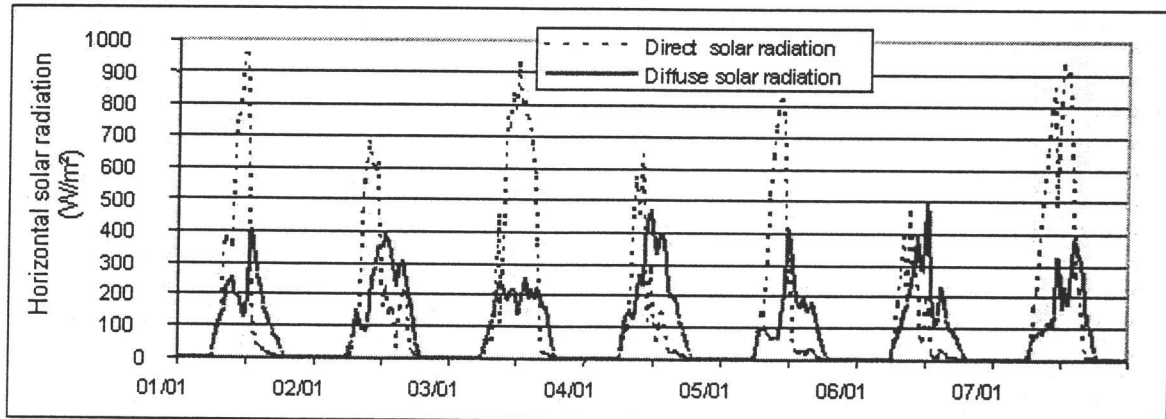


Figure 8 : Solar radiation during the assessment of the solar protection of the roof

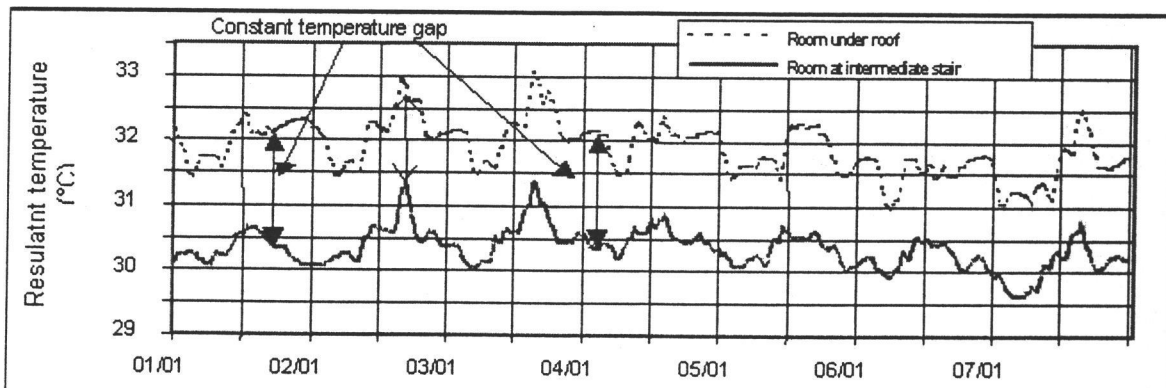


Figure 9 : Comparison of the resultant temperature in two dwellings (one under roof and the other one at intermediate level)



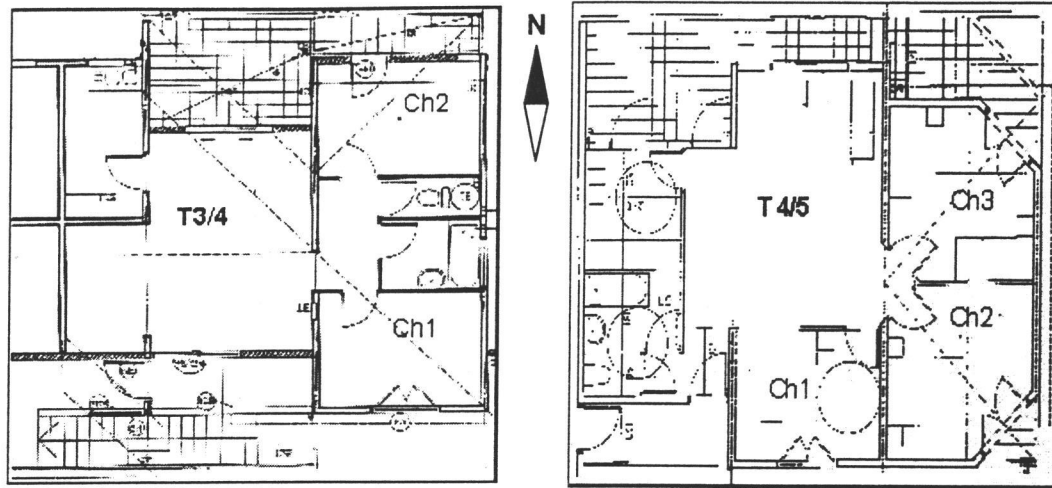


Figure 6 : Plan view of the instrumented dwellings (left side : C1T3 and C2T3, right side T4RdCand T4R1)

### 5.2 Data acquisition

A portable data-logger was set up close to the buildings to record all the climatic data (external temperature and humidity, direct and diffuse solar radiation, wind speed and wind direction).

During non-occupied periods, the sensors used were thermocouples for measurement of indoor air temperature shielded against solar radiation thanks to aluminium cylinders, globe temperature and surface temperatures on walls and roofs; thermo-hygrometers for the relative humidity, and accurate anemometers for indoor air speed (see Figure 7). Data was collected every minute and the average was calculated every hour.

During occupied periods, the sensors were like small "white boxes" with internal memory which could be wall mounted. They gave temperature and hygrometry measurements every 30 minutes over several months.

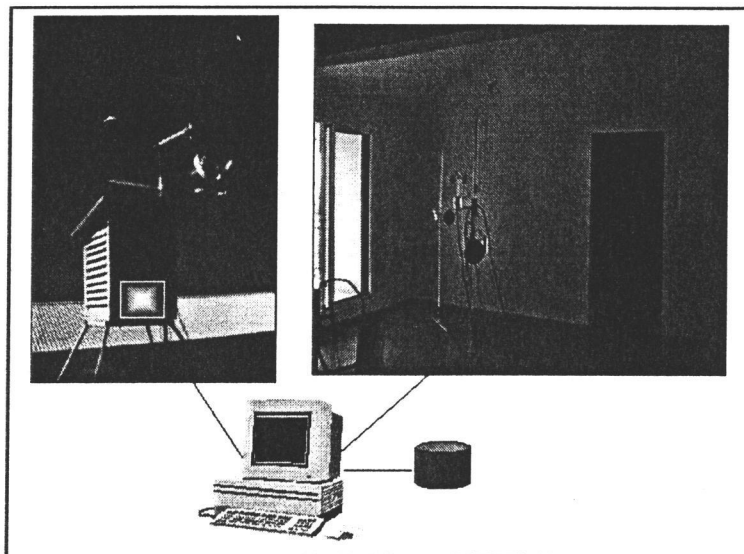


Figure 7 : Measurements of indoor air and globe temperature inside dwelling

The measurement results and analyses have been supplemented for both projects by a sociological survey in inhabited dwellings in order to understand how thermal comfort, acoustic comfort (in tropical climates, it might be difficult to obtain thermal comfort and acoustic comfort at the same time), visual comfort and dwelling environment are experienced by the occupants. These campaigns took place during the two last summers (on 1998 for « La Trinité » and on 1999 for « La Découverte ») in order to assess the thermal performance of flats during extreme climatic spells (the hot and wet season in Reunion occurs from the middle of December to the middle of April). The sociological survey was performed for the project « La Trinité » in April, 1998 and for « La Découverte » in April, 2000.

With the agreement of the housing companies, in each case («La Trinité» and «La Découverte») four dwellings were instrumented during the hot season. Dwellings were selected in order to allow for comparison and studies of various parameters such as roof and wall thermal insulation, and natural ventilation. Thus we chose a flat under a roof next to the gable and the same flat at a lower level to test the influence of the roof and of the solar protection of the glazings (see dwellings T4R1 and T4Rdc in Figure 4 and Figure 5). The two other instrumented flats were identical in orientation and in level and floor (see the dwellings C2T3 and C1T3 in Figure 4 and Figure 5), in order to test different scenarios such as the effect of natural ventilation with one flat used as a control and the second in which we modified its configuration.

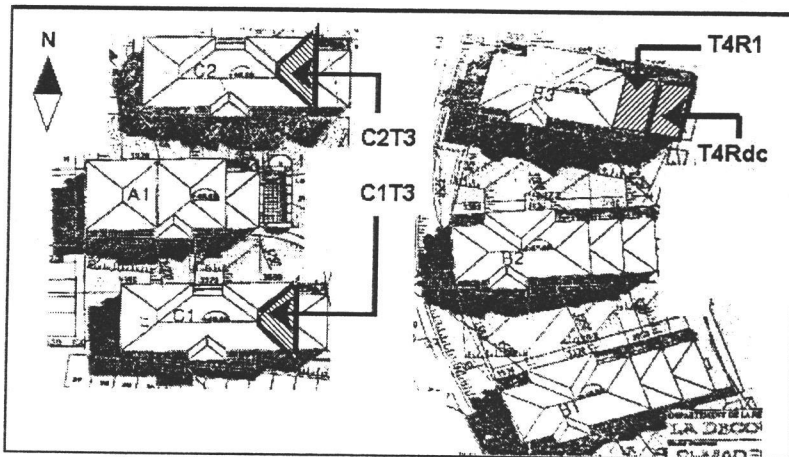


Figure 4 : Location of the instrumented dwellings on the overall building plan «La Découverte»

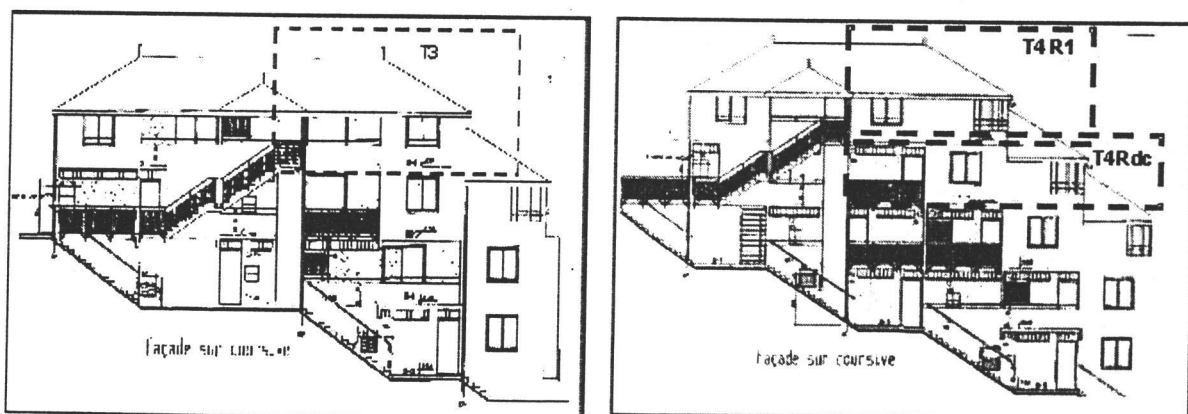


Figure 5 : Location of the instrumented dwellings : the southern facades

As far as solar protection of walls is concerned, the colour is light and materials used are hollow concrete blocks. In the reference document (Célaire and Jourdan 1997), it is specified to add 1cm polystyrene type insulation on East and West sides. The southern facade was not insulated because overhangs protect it. In addition, as the initial project did not provide solar protection for bedrooms windows, it was specified to add overhangs on exposed windows of the northern facade. However, the solar protection of the east windows of bedrooms remained insufficient because of a poor roof overhang (see Figure 7). Moreover, there is no solar protection of the southern windows. A dispensation was made concerning that points.

Concerning natural ventilation, ECODOM standards require a 2 square metres porosity for bedrooms whereas the initial project only had 1.44 square metre. This is why all the original windows have been replaced by glazed doors in order to increase the porosity at 25% of the mean of the surface of the facades. To reach the same porosity indoors, we requested that fans should be added above the bedroom doors. Balconies were also added all along the facade for solar protection of windows and of walls (see Figure 3). The position of the bedroom doors was modified compared to the initial project in order to maximise the airflow transfers inside the dwelling, so that the angle of the doors and the walls was 45° (see Figure 6 - T4 dwelling).



Figure 3 : The “La Découverte” project – northern façade

## 5. THE MONITORING

### 5.1 Choice of dwellings and main objectives

A monitoring was launched for the first ECODOM dwellings in order to validate the experimental impact of the passive cooling specifications on the performances of the envelope of the building and on the occupant comfort.

The instrumentation campaigns were carried out for the first two ECODOM projects implemented in Reunion.

Our first objective was to test the performances of the buildings without the occupants. In this way, we were able to make our own measurement scenarios and modify the configuration of the apartments without disturbing the tenants. Secondly, we undertook a measurement campaign in 6 occupied flats (for “La Trinité” only) to test the dwellings in a real situation.



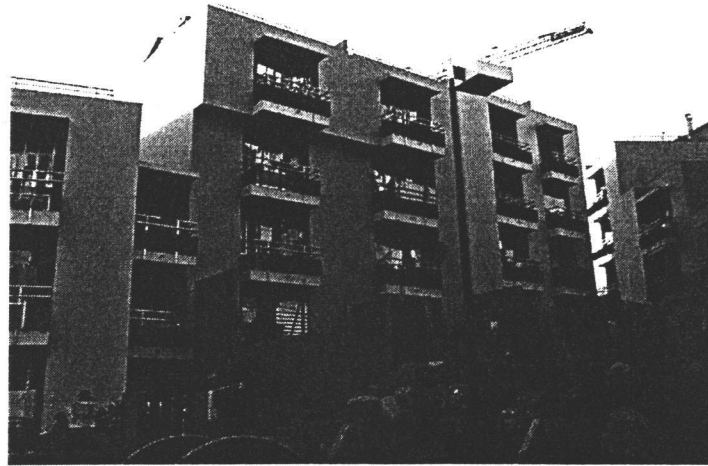


Figure 2 : The project “La Trinité” – eastern facade

The ECODOM specifications for “La Trinité” are :

As for the solar protection of the dark-coloured terrace roof, it was recommended to put an 11 cm insulation instead of the 6 cm one originally planned (see Table 1).

As far as the solar protection of medium coloured walls is concerned, no insulation of walls was planned even if the specifications required it, but because of the advanced stage of the project, a dispensation was granted over this.

As for the solar protection of windows, horizontal overhangs are planned for the main facade facing East (bedrooms) and West (living room). Nevertheless, the geometric values of the overhangs are undersized compared to the ECODOM values. The d/h ratio is 0.4 instead of 0.8 and 1 (see Table 2). A dispensation was granted over this point as well.

The natural ventilation of the dwellings complied with the ECODOM values. The porosity of the openings was more than 25% of the mean of the façade surface, which guarantee a good air exchange rate of each dwelling. For some dwelling, it was simply required to change the number of sliding parts of the French windows (3 instead of 2) to increase the porosity. The internal porosity is respected thanks to internal louvers located above the bedroom doors that increase the surface in indoor openings up to 2 m<sup>2</sup>.

As for the “La Découverte” project, no modification was made regarding site location because gardens around buildings had already been planned. In addition, the project already had an optimal orientation as the main facades face north and south, with limited west and east wall exposure to morning and afternoon low incident sunrays. Thus the only facade to be upgraded was the northern one (by adding balconies), as the southern one is seldom exposed (for the southern hemisphere latitude of Reunion Island, the midday sun only shines on southern facades in december).

As far as solar protection of the roof was concerned, the architect had already planned 5 cm insulation for red and blue roofs. According to table 1, this is not enough. Therefore, he was asked to increase the insulation thickness up to 8 cm (the value for medium colours) and to use polystyrene as insulation rather than mineral wool. Mineral wool is fairly cheap but not very well adapted to tropical climates : it loses its thermal properties when it absorbs ambient humidity .

## VALIDATION EXPERIMENTALE D'UN CODE DE MODELISATION THERMIQUE DE BATIMENTS (CODYRUN) UNE APPLICATION EN CLIMAT TROPICAL HUMIDE

*François GARDE*

*Université de la Réunion - Laboratoire de Génie Industriel  
Electricité de France - Ile de la Réunion*

*Harry BOYER*

*Université de la Réunion - Laboratoire de Génie Industriel*

*Jean BRAU*

*INSA de Lyon. CETHIL - Equipe Equipement de l'Habitat*

*Jean Claude GATINA*

*Université de la Réunion - Laboratoire de Génie Industriel*

### RESUMÉ :

CODYRUN, fruit d'une recherche commune entre L'INSA de Lyon et l'Université de la Réunion, est un logiciel multizone et multimodèle de simulation le comportement thermo-aéraulique de bâtiments. Parmi les différentes méthodes de validation, seule une validation expérimentale conduite suivant un protocole rigoureux conduit à une qualification indiscutable des modèles et du logiciel dans sa globalité. C'est cette approche, appliquée au cas de la thermique des bâtiments que détaille cet article. Après une présentation du logiciel, nous présentons le protocole de mesures effectuées sur un bâtiment représentatif de l'habitat réunionnais et les premiers résultats obtenus.

### 1. L'OUTIL CODYRUN

L'objectif de ce travail était de produire un code informatique performant de simulation thermique de l'habitat, regroupant des aspects conception et recherche, et adapté aux différents types de climats. Ce logiciel multizone et multimodèle, baptisé *CODYRUN*, intègre en particulier la ventilation naturelle et les transferts d'humidité. Les trois parties principales sont les modules de description du bâtiment, de simulation et d'exploitation des résultats. La description devant permettre de saisir un bâtiment quelconque, nous avons été amené à le décomposer en trois types d'entités qui sont des *Zones* (du point de vue thermique), des *Interambiances* (séparations entre zones, l'extérieur étant considéré comme une zone particulière) et des *Composants* (parois, vitrages, systèmes de traitement d'air, ...). Développé sur PC en langage C sous l'environnement Windows, le produit bénéficie de toute l'interactivité nécessaire à un outil de conception (Multi-fenêtrage, souris, ...).

Lors d'une simulation, un des aspects les plus intéressants est de proposer à l'expert thermicien le choix entre différents modèles physiques. La finalité peut être, pour un type de climat donné, de réaliser des études de sensibilité du logiciel à ces différents modèles pour choisir ceux à intégrer dans un outil de conception adapté. De même, fonction de l'objectif recherché lors de la simulation (suivi fin des températures ou estimation d'une consommation énergétique annuelle), il est aussi intéressant de pouvoir sélectionner les modèles mis en jeu. Dans la plupart des logiciels existants, le choix des modèles étant fait, leur application est globale à l'ensemble du bâtiment. Le caractère multizone et la modélisation détaillée des transferts aérauliques conduisent rapidement à des temps de calculs qui ne sont pas compatibles avec un outil de conception. Il nous est alors apparu intéressant de permettre, pour certains des phénomènes, une application sélective des modèles. Dans le cas de cette étude, nous verrons l'intérêt de cet aspect multimodèle lors de la validation.

Basé sur l'analyse nodale, le modèle thermique, noyau de la simulation, considère tout d'abord les équations de bilan thermique de chacun des noeuds de discrétisation des parois et des vitrages.

Associées au bilan sensible du volume d'air, ces équations constituent l'équation matricielle d'état d'évolution de la zone, du type

$$[C] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} = [A] \{T\} - \{B\}$$

Le couplage des zones entre elles est assuré grâce à un processus de connexion itératif. A chaque pas de temps, la résolution à l'aide d'un schéma aux différences finies implicites du système obtenu pour chacune des zones et les itérations de couplage entre les zones permettent de calculer l'évolution des températures et des puissances sensibles.

## 2. VALIDATION IN SITU DE CODYRUN

### 2.1 Données météorologiques à l'île de la Réunion

L'île de la Réunion fait partie de l'archipel des Mascareignes, située dans l'ouest de l'Océan Indien au large de Madagascar. Sa superficie est de 2500 km<sup>2</sup> environ et elle se situe par 21°5' de latitude Sud et 55°1' de longitude Est. L'insularité et la latitude de ce département lui confèrent un climat de type tropical humide, caractérisé par :

- de faibles variations de températures (l'amplitude jour/nuit reste inférieure à 10°C pour une température maximale qui dépasse rarement 32°C).
- une forte humidité relative (la moyenne annuelle de l'hygrométrie est de l'ordre de 70%)
- un rayonnement solaire intense : le rayonnement global peut atteindre plus de 1000 W/m<sup>2</sup> par ciel clair et 600 W/m<sup>2</sup> par ciel couvert, d'où une contribution relativement importante du diffus.
- l'influence des alizés : ce vent souffle de secteur Est/Sud-Est surtout pendant la période de l'hiver austral (Juin à Octobre) et devient plus faible pendant les mois de Décembre à Mars qui sont par ailleurs les mois les plus chauds.

Le relief exceptionnel de la Réunion provoque également des spécificités climatiques propres à notre île. Ceci implique que le climat de l'île est modulé dans l'espace par deux autres paramètres :

- *l'altitude* : la température décroissant à raison de 0.7°C tous les 100m, il est à noter la présence de gel au dessus de 1000 mètres. Signalons aussi que la couverture nuageuse augmente généralement au fur et à mesure que l'on s'élève, l'ensoleillement dans les hauts n'atteignant parfois que la moitié de la valeur observée sur le littoral.
- *l'exposition au vent*: les massifs montagneux partagent l'île en deux. Nous avons en effet une côte au vent à l'Est, où l'on observe une forte nébulosité et d'importantes précipitations, et une côte sous le vent à l'Ouest, nettement plus ensoleillée et qui connaît des problèmes de sécheresse.

### 2.2 Choix du site

Le site que nous avons expérimenté se trouve dans la zone littorale Ouest. Nous avons volontairement choisi cette localisation pour plusieurs raisons : cette zone, comme nous venons de le décrire précédemment, se situe sur la côte Ouest et ne peut donc bénéficier des effets dus aux alizées. Les conditions météorologiques y sont non seulement les plus extrêmes, mais également les plus stables quant à la reproductibilité du système atmosphérique. Nous disposons donc d'un site idéal pour expérimenter un habitat soumis aux conditions climatiques les plus difficiles de l'île. De plus, la région littorale reste encore la région la plus peuplée de l'île, l'habitat que nous avons expérimenté constitue donc un élément représentatif de l'architecture réunionnaise contemporaine.

### 2.3 Description de l'habitat

L'habitat choisi est idéal pour une expérimentation in situ car bien isolé (peu de masques lointains), de configuration simple avec peu de pièces (Figure 1). La maison est constituée de deux chambres, avec cuisine, toilettes, salle de bain et varangue, de construction à structure légère. La varangue est le nom utilisé à la Réunion pour désigner une véranda. Elle est dans notre cas ouverte sur les côtés Nord et Est. Les parois sont en béton lourd de 15 cm et recouvertes à l'intérieur de

lambris de 3 mm d'épaisseur. La toiture de la maison est un complexe tôle/lame d'air non ventilée/contreplaqué. Ce type de toiture est couramment utilisé à la Réunion en raison de son faible coût. La tôle est de couleur grise pour la partie de toiture située au dessus de la chambre 1, et de couleur rouge pour le reste de l'habitat. La toiture de la varangue est de la tôle simple de couleur grise.

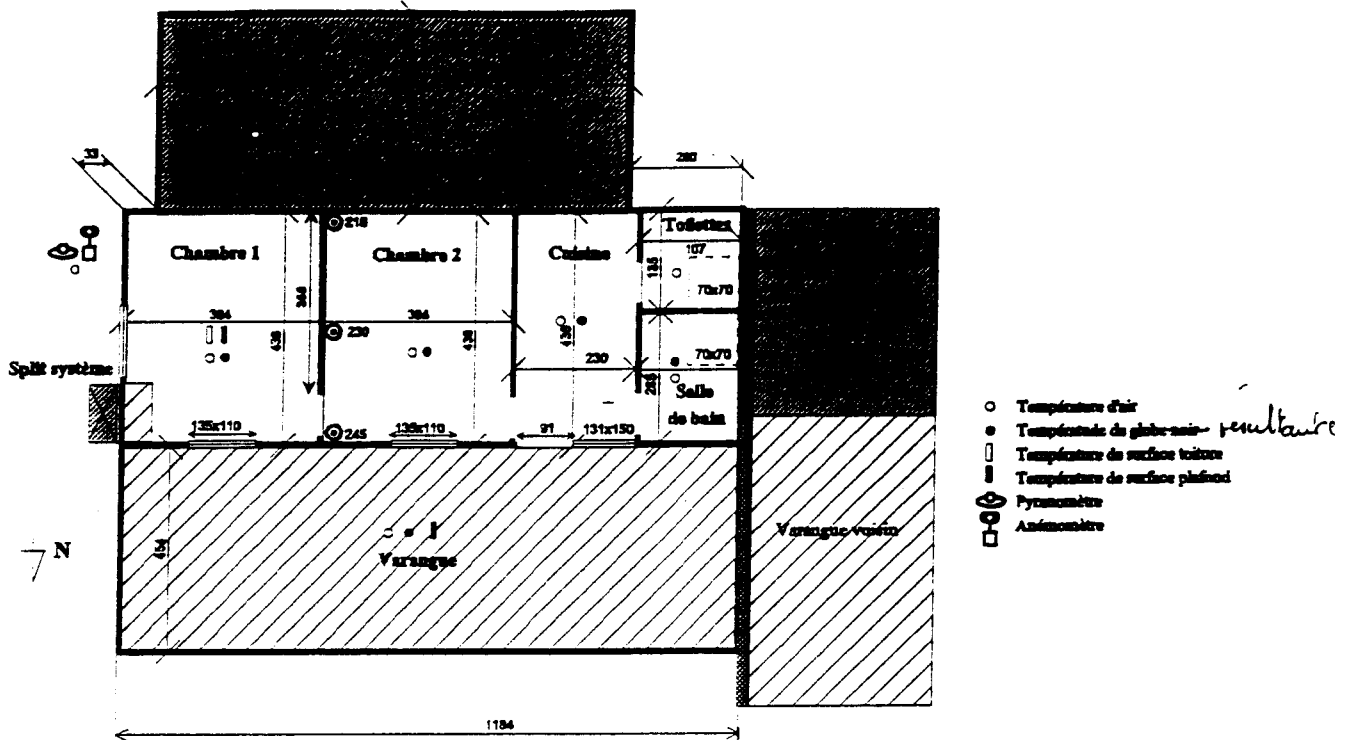


Fig 1 : Plan de la maison expérimentée in situ, et emplacement des capteurs

#### 2.4 Dispositif d'acquisition de données

Le coeur de notre système de mesure est une centrale d'acquisition de données autonome, de type Micrologger Campbell Scientific CS-21X. Cette technologie nous a permis de réaliser un dispositif portable en utilisant une structure d'acquisition de mesures de type arborescent. En effet, devant le nombre important de capteurs et la nécessité de les répartir sur le site à expérimenter, il s'avère indispensable de disposer de centres secondaires ou multiplexeurs de type CS-AM32, reliés à la centrale d'acquisition. Enfin, un micro-ordinateur portable peut être connecté à la centrale CS-21X via une interface optique, les échanges d'informations entre les deux appareils se faisant selon le protocole d'échange série RS-232C.

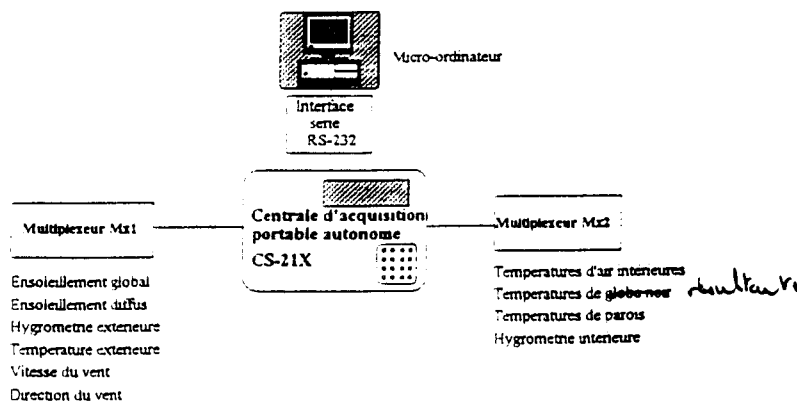


Fig 2 : Dispositif d'acquisition de données



Lors de nos expérimentations, nous avons mesuré au niveau des sollicitations externes la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, l'ensoleillement global, la vitesse du vent et les températures de surfaces des toitures. Au niveau des paramètres internes, nous avons mesuré dans chaque pièce la température sèche d'air intérieur et la température de globe noir au moyen de thermocouples type T, situés à 1.50m du sol. Nous avons également mesuré les températures de surface des plafond et de sous face de la varangue. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de sondes platine de contact. L'emplacement des capteurs est indiqué sur la figure 1. Les températures sont relevées toutes les minutes et moyennées sur une demi heure. Les mesures de vitesse de vent et d'ensoleillement sont effectuées toutes les dix secondes et moyennées sur une demi heure également. Les données sont ensuite enregistrées dans la mémoire de la centrale d'acquisition et récupérées via la liaison série RS232-C sur un portable PC. Elles peuvent ensuite être exploitées, traitées et analysées sous forme de fichier-tableur type EXCEL.

## 2.5 Protocole de mesures

La validation de CODYRUN se déroule suivant plusieurs phases expérimentales. Chaque phase aura pour but de valider un modèle bien précis. Ces différentes phases sont les suivantes :

- *Habitat passif (sans système de traitement d'air)*  
Expérimentation sur l'habitat, portes extérieures fermées, portes intérieures ouvertes (cas monozone)  
Expérimentation sur l'habitat tout fermé, portes intérieures et extérieures (cas multizone)  
Expérimentation tout ouvert
- *Habitat actif+ (avec système de traitement d'air)*  
Expérimentation sur l'habitat tout fermé, l'intérieur comme l'extérieur  
Expérimentation sur l'habitat, extérieur fermé, influence des vitrages dans la chambre 1  
Expérimentation sur l'habitat, extérieur fermé, influence du renouvellement d'air dans la chambre 1  
Expérimentation sur l'habitat, extérieur fermé, intérieur ouvert

Les premiers résultats présentés dans cet article concernent des expérimentations menées dans le cas monozone et multizone pour l'habitat passif. Cette première phase a pour but de valider le modèle thermique, pour nous permettre d'aborder ultérieurement l'aspect thermo-aéraulique. Les expérimentations futures porteront sur un habitat actif, c'est à dire équipé dans une pièce d'un système de traitement d'air type split-système. Les données expérimentales seront ensuite comparées avec différents modèles de STA qui seront intégrés dans le code de calcul de CODYRUN.

## 3 COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX AVEC CODYRUN

Nous allons comparer les résultats obtenus lors d'une période d'expérimentation de quatre jours, pour un habitat fermé sur l'extérieur, mais ouvert à l'intérieur. Nous allons dans ce cas considérer le bâtiment comme monozone, constitué des pièces intérieures à l'habitat. Les hypothèses suivantes ont été adoptées : température ambiante de la varangue égale à celle de l'air extérieur et absence de transferts avec l'abri en tôle, l'abri en dur du voisin et la varangue voisine.

La figure 4 montre que le modèle sous-estime la température d'air intérieur par rapport aux mesures. L'outil permettant de suivre l'évolution de toutes les températures du bâtiment, nous avons pu nous assurer de la cohérence des températures de surfaces extérieures du toit (par lequel se font la plupart des apports dans notre cas) et constater par contre un écart très important pour les températures de sous face du plafond. Pour notre toiture constituée d'une tôle extérieure, d'une lame d'air et de contre plaqué, la valeur  $\lambda_j$  utilisée pour la conductivité équivalente d'air ( $0.14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) est celle du DTU (Document Technique Unifié), prenant en compte conduction et convection dans la lame d'air. Dans notre cas, en climat tropical, en été et en plein soleil, les transferts de chaleur au travers de la lame d'air se font principalement par échanges radiatifs de grande longueur d'onde. Si nous supposons ces échanges linéarisés à l'aide d'un coefficient  $h_r$ , les équations de bilan des noeuds de surface de par et

d'autre de la lame d'air font intervenir des termes de conduction,  $\frac{\lambda_2}{e} (T_{i1} - T_{i2})$  et de rayonnement  $h_r (T_{i1} - T_{i2})$ . Pour intégrer ces derniers, il suffit de considérer une nouvelle conductivité équivalente de l'air,  $\lambda_2' = \lambda_2 + e h_r$ , ce qui pour notre cas revient à considérer une valeur de  $0.74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

En utilisant cette dernière valeur pour la simulation, les courbes 5 et 6 sont obtenues et attestent d'une meilleure prise en compte des échanges. Nous notons que la plus grande partie des échanges thermiques se font par la toiture. Contrairement aux cas climats dits tempérés, les transferts thermiques dans l'habitat sous nos latitudes sont liés au rayonnement. Dans notre cas, la protection solaire est inefficace contre le rayonnement, les températures de plafond sont importantes, ainsi que les températures d'air à l'intérieur du bâtiment.

Fig 3 : ENSOLEILLEMENT (W.m-2)

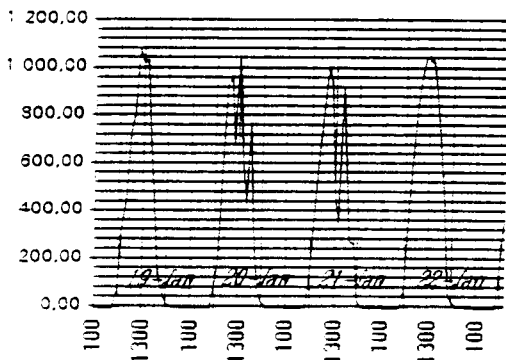


Fig 4 : TEMPERATURES AMBIANTES DE L'AIR

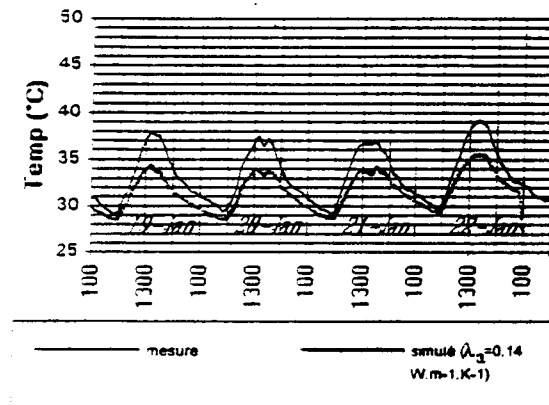


Fig 5 : TEMPERATURES AMBIANTES DE L'AIR

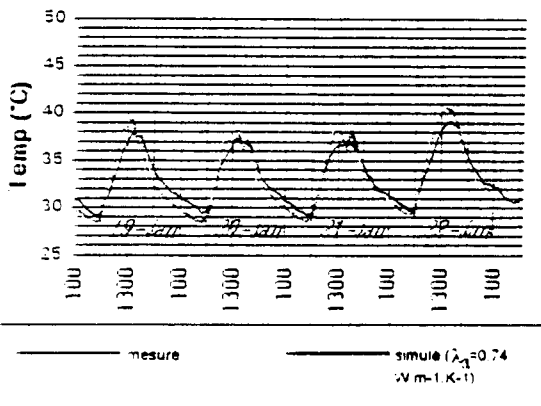
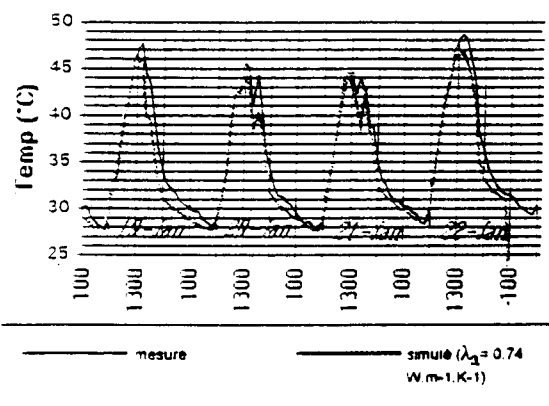


Fig 6 : TEMPERATURE DE SOUS-FACE DU PLAFOND



Cette simulation monozone nous a donc permis de "caler" le modèle du composant toiture. Nous avons mis à profit le caractère multimodèle de *CODYRUN* pour choisir dans cette paroi un modèle conductif détaillé, de manière à avoir accès aux températures de surface. D'une manière plus générale, cette phase peut nous permettre de modéliser plus finement certains composants complexes et de réduire les risques d'erreur dans les cas multizone, puis avec aéraulique, et ensuite avec ou sans système de traitement d'air.

Pour les deux courbes suivantes concernant le cas multizone, en conservant l'hypothèse d'absence de transferts avec les constructions accolées, le bâtiment a été modélisé en considérant 6 zones thermiques, constituées de chacune de ces pièces intérieures et de la varangue. Cette dernière zone a été prise en considération pour ne pas occulter les transferts radiatifs entre la sous face de la tôle et les parois verticales des pièces adjacentes (Chambre 1, Chambre 2, Cuisine et

Salle de bain). Les résultats présentés concernent les températures intérieures d'air de la Chambre 1 et de la salle de bain, sur une autre séquence climatique de 24 heures.

Fig 7 : TEMPERATURE AMBIANTE  
CHAMBRE 1

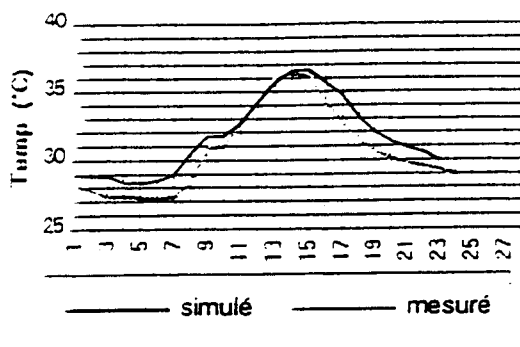
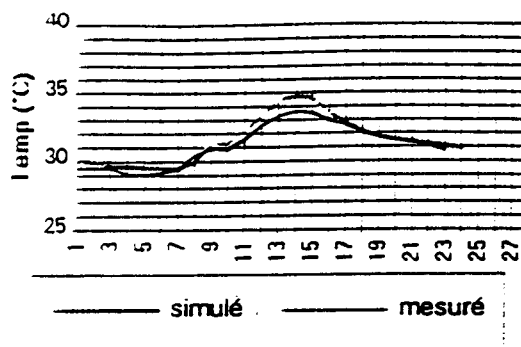


Fig 8 : TEMPERATURE AMBIANTE  
SALLE DE BAIN



Les courbes précédentes (Fig 7-8) attestent de la cohérence des résultats du module thermique multizone de notre code de simulation. Les écarts cependant observés proviennent vraisemblablement de la méconnaissance des paramètres thermophysiques des constituants (propriétés radiatives, conductives, mise en oeuvre des matériaux,...), ou encore de nos hypothèses de modélisation de l'habitat. Nous avons par ailleurs prévu de mener une campagne sur une cellule expérimentale de laboratoire afin d'affiner cette validation du code thermique.

#### 4 CONCLUSION

Nous avons vu que la validation expérimentale in situ souffre d'une connaissance imparfaite des caractéristiques thermophysiques de tous les composants de l'habitat. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous menons nos expérimentations suivant un protocole systématique, de manière à isoler les phénomènes (thermiques, aérauliques, transferts d'humidité), à les traiter successivement, pour ensuite pouvoir prédire finement le comportement de l'habitat. Dans une deuxième phase, lorsque le modèle thermo-aéraulique sera validé (à l'aide de l'analyse des signaux d'erreur), nous pourrons alors étudier l'habitat avec système de traitement d'air. Nous nous attacherons à l'étude des consommations énergétiques du système, un autre objectif de notre travail étant l'intégration au code de calcul *CODYRUN* de différents modèles de split-système et leur validation pour ainsi effectuer des prévisions détaillées suivant des scénarios climatiques types.

#### 5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BECKER, R., PACIUK, M. "Experimental validation of TARP for prediction of overall performance under various heating patterns", *Energy and Buildings*, 20, 121-132 (1993).
- BARONNET, F., "Etude thermique de l'habitat individuel à la Réunion. Thèse : Sci : Université de Paris VII, 182 p (1987).
- BOYER, H., "Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiples de modèles". Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 248p, (1993)
- BRAU, J., "Modélisation thermique des bâtiments. Validation des modèles de calcul par une méthode expérimentale en ambiance climatique simulée". Thèse: Sci: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1980, 295p.
- IRVING, A.D., "Validation of Dynamic Thermal Models", *Energy and Buildings*, n°10, p213-220 (1988).
- Manuel d'utilisation de la CS-21X, Royaume-Uni: Campbell Scientific, (1986).
- Manuel d'utilisation du développeur PC-208, Royaume-Uni: Campbell Scientific, (1986).
- MILLET, F., "La mesure des températures", PYC Editions, (1984)

# NECESSITE DE L'APPROCHE MULTIMODELE DANS LA MODELISATION DES SYSTEMES DE TRAITEMENT D'AIR

**François GARDE, Franck LUCAS, Harry BOYER**  
Université de la Réunion - Laboratoire de Génie Industriel  
garde@univ-reunion.fr

**Jean BRAU**  
INSA de Lyon. CETHIL - Equipe Equipement Thermique du Bâtiment

## RÉSUMÉ

La modélisation des systèmes et le couplage bâtiment/systèmes permet de prédire la consommation et le dimensionnement de l'installation de climatisation. Malheureusement, 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 ce cas, les modèles horaires utilisés en thermique du bâtiment se révèlent peu précis car ils ne tiennent pas compte de la régulation et du temps de fonctionnement du système.

Nous nous proposons de présenter dans ce papier une approche multimodèle dans la modélisation des systèmes de traitement d'air. Trois modèles de systèmes ont été développés à différents niveaux de finesses et ont été intégrés dans un code de calcul thermo-aérodynamique développé à l'Université de la Réunion. Le modèle le plus simple est un modèle horaire, le plus détaillé est un modèle à pas de temps réduit tenant compte à la fois de la régulation du système et de l'évolution en régime dynamique.

Une comparaison inter-modèle réalisée à différents taux de charge de climatiseur a permis de mettre en évidence la précision de chaque modèle.

## 1 LES MODÈLES DE SYSTEME DE TRAITEMENT D'AIR INTÉGRES AU CODE

### 1.1 Le code de simulation CODYRUN

CODYRUN [1] est un code informatique de simulation thermique de l'habitat, regroupant des aspects conception et recherche, et adapté aux différents types de climats. Ce logiciel multizone et multimodèle, intègre en particulier la ventilation naturelle et les transferts d'humidité. Développé sur PC en langage C sous l'environnement Windows, le produit bénéficie de toute l'interactivité nécessaire à un outil de conception (Multi-fenêtrage, souris...).

La modélisation des phénomènes physiques (transferts thermiques, aérodynamique et d'humidité) est basée sur l'utilisation de modèles séparés. Le couplage de ces phénomènes est résolu numériquement à travers un schéma itératif. L'intégration des systèmes de traitement d'air (STA) est réalisée par des modèles supplémentaires permettant de déterminer les puissances sensibles et latentes à intégrer à chaque pas de temps dans les équations liées respectivement au noeud d'air et au bilan hydrique de la pièce considérée.

### 1.2 Modèle horaire – Modèle niveau 0

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.

Ce modèle suppose que les échanges de puissances sensible et latente sont découplés et que son intégration est faite de manière idéale, le système devant répondre à une consigne à la fois en température et en humidité. Le système est seulement modélisé par son efficacité frigorifique supposée constante et prise au régime nominal.

Ce type de modèle est utilisé pour résoudre deux types de problèmes :

- *Dimensionnement d'installation et estimation des consommations*  
Indépendamment de toute considération concernant le système de climatisation, il s'agit de déterminer la puissance sensible et la puissance latente à mettre en jeu pour maintenir une consigne de température et une consigne d'hygrométrie supposées connues. L'efficacité frigorifique permet de déduire les consommations mensuelles ou annuelles pour comparer différentes solutions techniques.
- *Approche système et étude de la dérive en température*  
Les puissances sensibles et latentes sont connues, la température d'air et l'hygrométrie intérieure sont à déterminer. Si les besoins en puissance de la pièce sont supérieurs à la puissance disponible, le code détermine la dérive en température et en hygrométrie. Le système est alors caractérisé par ses puissances sensible et latentes (limitées), et son efficacité frigorifique constante.

### 1.3 Modèle niveau 1 - Modèle à pas de temps réduit

L'objectif de ce modèle est de reproduire le comportement d'un appareil de climatisation individuel en régime dynamique et en tenant compte de la régulation.

Nous ne pouvions pas par conséquent rester à un pas de temps de une heure pour la modélisation des cycles marche/arrêt. Nous avons donc adopté un pas de temps de 1 minute pour ce modèle ainsi que pour le modèle 2 qui sera présenté dans le paragraphe suivant.

Les caractéristiques principales du modèle 1 sont donc :

- Pas de temps réduit à une minute ;
- Prise en compte du régime dynamique du système au démarrage par une équation exponentielle du premier ordre [2], [3] ;
- Prise en compte de la régulation (zone morte de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) ;
- En régime permanent, les puissances frigorifiques et absorbées sont égales aux caractéristiques de l'appareil en régime nominal. Le SHF (rapport entre la puissance frigorifique sensible et la puissance frigorifique totale fournie par le STA) et l'efficacité frigorifique sont donc constants.

### 1.4 Modèle niveau 2 - Modèle à pas de temps réduit

Ce modèle vise à représenter le fonctionnement d'un climatiseur individuel en régime permanent et en régime dynamique, en tenant compte d'une régulation Tout ou Rien. Contrairement au niveau 1, les caractéristiques de l'appareil (puissances frigorifiques totales, sensibles et absorbées) dépendent des conditions intérieures et extérieures.

Le modèle permet, connaissant certains points de fonctionnement de l'appareil, d'en déduire son fonctionnement en régime permanent quelles que soient les sollicitations intérieures et extérieures. Ce modèle est donc un modèle de régression basé sur des données constructeur.

Les caractéristiques principales du modèle 2 sont donc :

- Pas de temps réduit à une minute ;
- Prise en compte du régime dynamique du système au démarrage par une équation exponentielle du premier ordre [2], [3] ;
- Prise en compte de la régulation (zone morte de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) ;
- En régime permanent, les puissances frigorifiques et absorbées dépendent des conditions intérieures (température et hygrométrie) et extérieures (température). Le SHF et l'efficacité frigorifique dépendent également des variations de ces conditions. Ce modèle est un modèle de comportement dont les équations de régression linéaires ont été déterminées à l'aide d'un tableau de données constructeur.

Il est à noter que les trois modèles sont décrits de manière détaillée dans [2].

## 2 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX POUR UN TAUX DE CHARGE FAIBLE

Une première approche expérimentale a eu lieu afin de déterminer la validité des modèles pour de faibles taux de charge. Le dispositif expérimental, constitué d'une cellule à échelle grandeur nature baptisée cellule LGI et d'un split-système, est décrit dans [4], [5] et [6]. Ce dispositif a d'ailleurs servi à valider non seulement le modèle d'enveloppe de la cellule mais également le couplage système-enveloppe dans certaines configurations.

Les résultats ont permis de faire une comparaison des modèles avec la mesure pour de faibles pas de temps. Cette comparaison a mis en évidence la nécessité d'ajuster certains paramètres dont nous avons besoin pour nos modèles tels que le temps de court-cycle, la détermination de la zone morte du régulateur du système et la détermination de la constante de temps pour la mise en régime du split-système [4], [5] et [6]. Par ailleurs, nous avons été obligé de tenir compte de l'anisotropie de l'air (réelle) qui n'est pas prise en compte dans les modèles horaires où la puissance frigorifique est instantanément transmise au nœud d'air. Pour tenir compte du temps de latence sur la température de consigne, la capacité de l'air a été multipliée par 7 [4].

Nous ne présentons ici que l'intégration au pas de temps horaire des résultats des modèles à pas de temps réduits. Cette intégration à l'heure est nécessaire pour permettre une comparaison avec le modèle niveau 0.

En ce qui concerne l'évolution de la puissance frigorifique totale (figure 1), les modèles 1 et 2 sous-estiment la puissance frigorifique réelle de 30% environ. Par contre, nous pouvons également observer les limites de la modélisation du modèle horaire avec une sous-estimation de la puissance frigorifique de plus de 50% pour le modèle 0.

Plusieurs raisons peuvent expliquer la sous-estimation de la puissance frigorifique par les modèles 1 et 2. Outre le fait que la puissance sensible n'est pas nulle après l'arrêt du compresseur, rappelons que ces modèles ont été ajustés pour tenir compte de l'effet de l'anisotropie de l'air et de l'écart entre la température de l'air intérieure et la température de reprise. En effet, la capacité thermique de la cellule est 7 fois plus importante que la capacité réelle. Ce « calage » semble donner des résultats satisfaisants au niveau de la modélisation de la température de l'air intérieur et de la puissance absorbée (figure 2), mais peut engendrer de mauvaises modélisations des puissances frigorifiques fournies par le système. C'est d'ailleurs là tout le problème de la modélisation des régimes transitoires. Une solution consisterait à brasser le volume d'air intérieur de la cellule pour homogénéiser les températures d'air et de reprise. Une étude récente [7], a d'ailleurs prouvé que la consommation frigorifique d'un climatiseur individuel pouvait être réduite de 40% si le volume d'air était brassé par un ventilateur plafonnier. L'inconvénient d'une telle solution serait de ne plus tenir compte de la spécificité d'une régulation sur la reprise d'air et sur le principe même de fonctionnement d'un split-système.

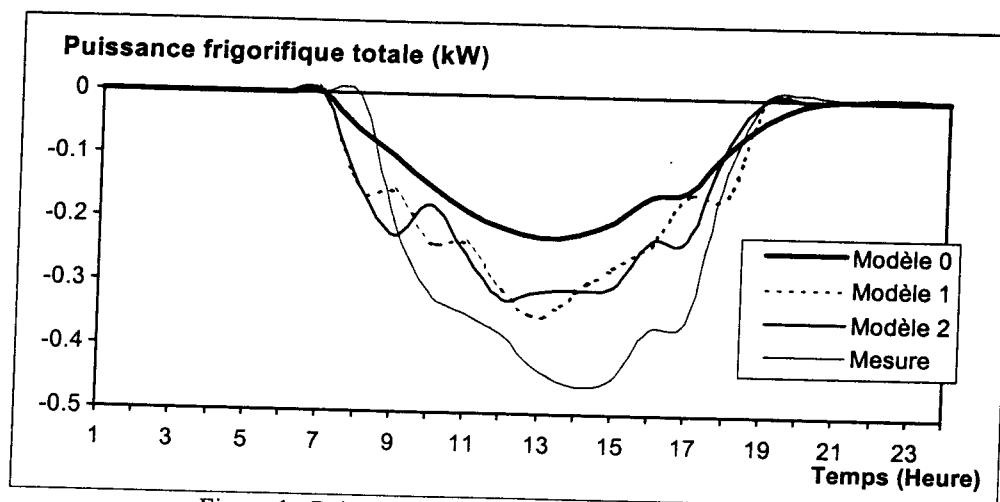


Figure 1 : Puissance frigorifique moyenne horaire (kW)  
Comparaison des modèles 0, 1, 2 pour un pas de temps de 1 heure.

En ce qui concerne la modélisation de la puissance absorbée (figure 2), le modèle 2 est le plus précis avec une différence de 5% par rapport à la mesure. Le modèle 1 a tendance à surestimer de 25% la mesure. Le modèle horaire reste le modèle le moins précis avec une différence de 60% par rapport à la mesure.

Il est à noter également que l'efficacité frigorifique moyenne réelle (cf tableau 1) est bien en dessous de l'efficacité du système en régime nominal. Le modèle 2 se rapproche le plus de la valeur réelle.

Les résultats sur la puissance absorbée confirment les problèmes de modélisation que nous avons évoqués précédemment. Un modèle horaire ne peut modéliser convenablement un système de traitement d'air lorsque celui-ci régule de manière importante. L'utilisation de modèles à pas de temps réduits se révèle intéressante lorsque les systèmes sont sur-dimensionnés par rapport à la demande réelle du bâtiment et sont donc soumis à des cycles Marche/Arrêt importants.

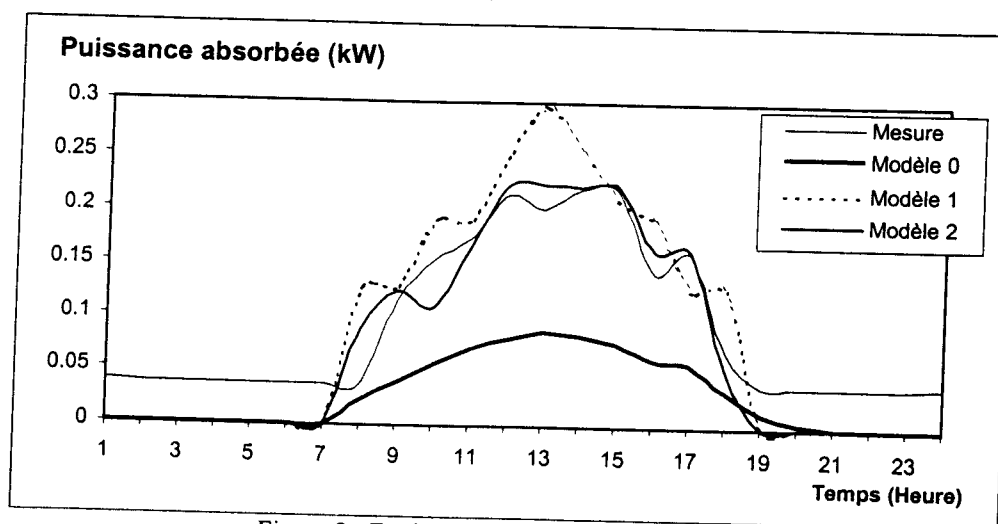


Figure 2 : Evolution de la puissance absorbée  
Comparaison des modèles 0, 1, 2 pour un pas de temps de 1 heure.

La précision des résultats pour les modèles à pas de temps réduits se fait également sentir pour l'estimation de l'efficacité frigorifique moyenne journalière (tableau 1). L'efficacité mesurée est inférieure à celle donnée en régime nominal et qui est utilisée par le modèle horaire. De plus, de nombreux codes utilisent l'efficacité nominale pour l'estimation des consommations électriques du système étudié [8]. Or, il s'avère que cette méthode n'est pas précise au regard des résultats précédents. L'efficacité frigorifique est à la fois fonction des conditions extérieures mais également du taux de fonctionnement de l'appareil. Une modélisation plus fine consisterait dans un premier temps à utiliser un modèle horaire ou l'efficacité frigorifique dépendrait de la température extérieure par exemple, comme le fait Loveday [9], mais cela ne suffit pas car ce genre de modèle ne tient pas compte du régime dynamique de l'appareil. Dans ce cas, seul un modèle à pas de temps réduit peut estimer l'efficacité réelle de l'appareil en fonction de son taux de marche. Nous voyons ici l'importance du modèle 2 dans la précision des résultats.

Tableau 1 - Comparaison modèles/mesure pour un pas de temps horaire

|                 | <i>Consommation électrique journalière(kWh)</i> | <i>Ecart modèle/mesure</i> | <i>Efficacité frigorifique moyenne</i> |
|-----------------|---|----------------------------|--|
| <i>Mesure</i>   | 1.68  |                            | 2.0                                    |
| <i>Modèle 0</i> | 0.68  | - 60%                      | 2.6                                    |
| <i>Modèle 1</i> | 2.09  | + 25%                      | 1.2                                    |
| <i>Modèle 2</i> | 1.76  | + 5%                       | 1.5                                    |

En conclusion, nous pouvons dire que ces premiers tests ont mis en évidence les limites d'un modèle horaire dans la modélisation des systèmes de traitement d'air car celui-ci ne tient pas compte de la régulation et du taux de marche du système. Les modèles à pas de temps réduits se révèlent plus précis malgré quelques problèmes de modélisation lors du régime transitoire de l'appareil. Toutefois, l'essai présenté ne reflète pas tout à fait la réalité dans la mesure où la puissance installée est 10 fois plus importante que les charges thermiques réelles de la cellule LGI. Le taux de marche moyen est en effet de l'ordre de 16%. En général, on peut considérer que le taux de marche moyen de ce genre d'appareil se situe plutôt aux environs de 60%. D'autres expérimentations sont donc à prévoir pour des taux de marche plus importants.

Le paragraphe suivant se propose de présenter rapidement une comparaison inter-modèle pour des taux de marche plus importants, et variant de 20% à 100%. Nous avons voulu ainsi vérifier la précision de chaque modèle pour différents taux de marche, même si nous n'avions pas de résultats expérimentaux comme élément de comparaison.

### 3 COMPARAISON INTER-MODÈLE - INFLUENCE DU TAUX DE MARCHÉ

La section précédente a mis en évidence l'importance du taux de marche dans la précision des modèles 0, 1 et 2. Nous nous proposons de présenter une comparaison des trois modèles pour différents taux de marche du système de climatisation.

#### 3.1 Méthodologie

Nous avons modélisé dans la cellule LGI des charges internes de manière à obtenir des taux de fonctionnement de 20%, 40%, 60%, 80% et 100%. La correspondance charges internes/taux de fonctionnement est résumée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 - Correspondance charges internes/taux de marche

| <i>Charges internes</i>                         |                     | <i>Taux de marche</i> |
|---|---------------------|-----------------------|
| <i>Sensibles (W)</i><br><i>(100% convectif)</i> | <i>Latentes (W)</i> | <i>(%)</i>            |
| 0   | 0                   | 20%                   |
| 380   | 380                 | 40%                   |
| 700   | 700                 | 60%                   |
| 1150  | 1150                | 80%                   |
| 1800  | 1800                | 100%                  |

Le fichier météo utilisé est un fichier de sollicitations constantes pour avoir un taux de marche constant sur toute la période de modélisation.

Les simulations ont été conduites pour les trois niveaux de modélisation. Les comparaisons ont porté sur les énergies frigorifiques totales, sensibles, latentes ainsi que sur la consommation énergétique du système de traitement d'air.

Nous rappelons que la consigne en humidité pour l'évaluation des charges latentes par le niveau 0 a été fixée à 60%.

### 3.2 Résultats

Les résultats des simulations sont présentés par la figure 3. Ces résultats proviennent de l'intégration des puissances frigorifiques totales, sensibles et latentes ainsi que de la puissance absorbée sur l'ensemble de la journée. Les critères de comparaison sont donc des critères énergétiques journaliers.

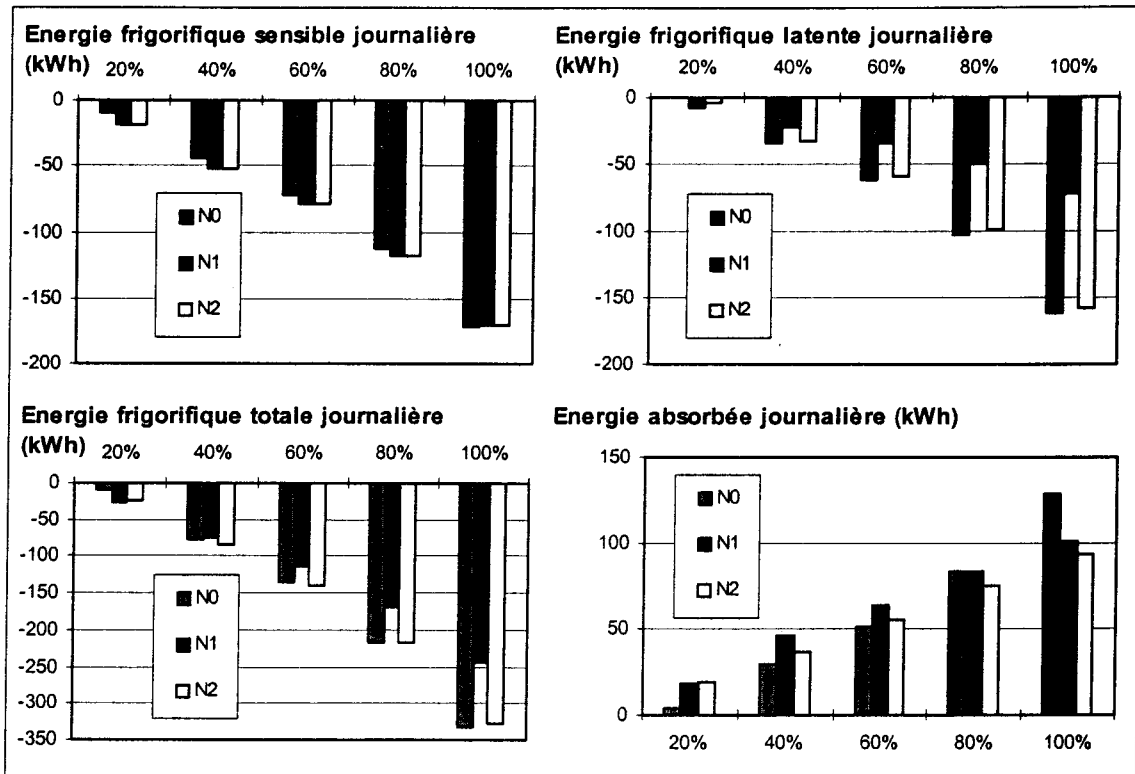


Figure 3 : Comparaison inter-modèle pour différents taux de marche

Les résultats montrent que le modèle 1 perd en précision pour l'estimation des charges énergétiques lorsque le taux de marche augmente. La différence par rapport au niveau 2 s'explique par une mauvaise prise en compte des charges latentes. Rappelons que le modèle 1 a un *SHF* constant et donc que la puissance latente délivrée par le modèle est constante en régime permanent. Les modèles 1 et 2 sont confondus pour des taux de charge faibles où la mise en régime du système prévaut sur les caractéristiques en régime permanent. Par contre, dès que le taux de marche est supérieur à 40%, le modèle 1 perd en précision, que ce soit pour l'estimation de l'énergie frigorifique totale délivrée par le système que pour l'énergie électrique consommée.

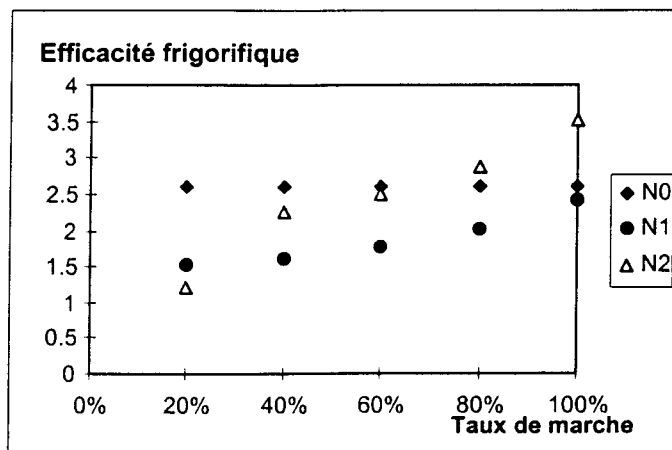


Figure 4 : Evolution de l'efficacité frigorifique pour différents taux de marche



Le modèle 0 et le modèle 2 ont des résultats similaires pour des taux de marche élevés pour l'estimation des consommations frigorifiques. Toutefois, le modèle 0 n'est pas fiable pour l'estimation de la consommation électrique. Celui-ci a tendance à sous-estimer la consommation électrique pour des taux de charge faibles et à la surestimer lorsque le système s'approche du régime permanent.

La figure 4 confirme ces remarques en montrant l'évolution de l'efficacité frigorifique pour les trois modèles en fonction du taux de marche.

Nous voyons au travers de la figure 4 que le modèle 0 qui suppose une efficacité frigorifique constante ne peut se suffire d'une telle modélisation : la dépendance réelle de l'efficacité frigorifique vis à vis du taux de charge et des conditions intérieures et extérieures est en effet trop importante. Le modèle 2 traduit par contre parfaitement l'évolution de l'efficacité en fonction du taux de charge.

#### 4 CONCLUSION

Le modèle 0 estime bien la consommation frigorifique mais l'hypothèse d'efficacité frigorifique constante induit des erreurs importantes pour l'estimation de la consommation électrique car cette grandeur dépend à la fois du taux de marche pour le régime dynamique et des conditions extérieures pour le régime permanent. Toutefois, ce modèle est un modèle horaire : le temps de calcul est donc faible.

Le modèle 1 permet de gagner en précision pour des taux de marche faible. Celui-ci permet de ne pas faire appel à un tableau constructeur. Par contre, ce dernier perd en précision dès lors que l'on dépasse des taux de marche de 40%.

Le modèle 2 reste le modèle le plus précis. Il permet de tenir compte à la fois de l'influence des conditions extérieures et intérieures en régime permanent, mais également du régime dynamique. Les résultats des différentes modélisations pour ce modèle sont très proches de résultats expérimentaux établis à partir d'autres climatiseurs individuels. Par contre, ce modèle fonctionne pour des pas de temps réduits (1 minute). Le temps de calcul est nécessairement plus important (60 fois plus que le modèle horaire).

Les premiers résultats issus à la fois de comparaisons expérimentales [4] mais également de comparaison inter-modèles montrent que les modèles à pas de temps réduits sont de bien meilleurs indicateurs pour la prédiction des consommations énergétiques, surtout lorsque le système étudié régule de manière importante. Le modèle horaire gagne en précision lorsque le système régule peu.

Par contre, la modélisation de l'efficacité frigorifique doit être améliorée et ne peut se suffire d'une valeur constante. Des modèles horaires existent [2], [3] mais nécessitent la connaissance ou l'estimation d'un facteur de correction qui est fonction du taux de marche. Nous voyons ici l'intérêt de l'aspect multi-modèle de notre code, dans la mesure où le niveau 2 pourrait estimer dans un premier temps l'efficacité frigorifique d'un système en fonction de son taux de marche. Dans un deuxième temps, le facteur de correction étant ainsi trouvé, il pourrait être intégré au niveau 0 et ainsi permettre une meilleure précision sur la consommation électrique du climatiseur tout en conservant la rapidité du temps de calcul.

#### 5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOYER, H., GARDE, F., GATINA, J.C., BRAU, J., « A multi-model approach to building thermal simulation for design and research purposes ». *Energy and Buildings*, 28, 1, pp. 71-79, (1998).
- [2] HAMEL, J., MERCADIER, Y. « Fonctionnement en régime transitoire des thermopompes et simulation thermique des bâtiments ». *SESCI Conference*, Calgary, Canada, p. 232-237, (1984).
- [3] O'NEAL D.L., Ph D., P.E., KATIPAMULA S., Ph D. « Performance degradation during on-off cycling of single -speed air conditioners and heat pumps : model development and analysis. » *Ashrae transactions - vol 97 - Part 2*, 316-323, (1987).
- [4] GARDE, F. « Validation et développement d'un modèle thermo-aérodynamique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes ». Thèse : Sci : Université de La Réunion, (1997).
- [5] 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 ». In *proceedings of CLIMA 2000*, Bruxelles, (1997).
- [6] LUCAS, F., GARDE, F., BOYER, H., GATINA, J.C. « Validation expérimentale et ajustement de paramètres de modèles de système de traitement d'air ». 3<sup>ème</sup> colloque interuniversitaire franco-québécois, Toulouse, (1997).
- [7] LIONNET, B., « Brasseurs d'air. Etude d'opportunité pour les DOM. Note interne EDF, Direction des Etudes et recherches », 42 p., (1996).
- [8] FLEURY, E., MILLET, J.R. Bâtiments tertiaires climatisés dans les DOM. Document d'application de la méthode Climadom. Rapport d'étude C.S.T.B n°96.078R, 50 p., (1996).
- [9] LOVEDAY, D.L., EWERS, R.A. « The cost effectiveness of heat pumps operated by a BEMS - A comparison of smart and standard control using dynamic simulation », in *proceeding of System Simulation in Buildings*, (1990).

**Thierry Alex MARA**  
University of La Reunion Island,  
Laboratoire de Génie Industriel,  
BP 7151, 15 avenue René Cassin,  
97 715 Saint-Denis, France.  
email : mara@univ-reunion.fr

**Harry BOYER**  
harry.boyer@univ-reunion.fr

**François GARDE**  
garde@univ-reunion.fr

# Parametric Sensitivity Analysis of a Test Cell Thermal Model Using Spectral Analysis

*Abstract : This paper deals with a method to perform parametric sensitivity analysis. Such a study is very important for modellers as it can provide fruitful information. Indeed, it can point out model's weaknesses and allows to identify the most important parameters in the model, which the modeller must know accurately to provide reliable results. After describing the approach, an application of the method in building thermal simulation is discussed. The study concerns a real test cell and gives coherent results as some of the most influential factors can be physically interpreted.*

## 1. Introduction

Sensitivity analysis (SA) of model output is a very important stage in model predictions analysis. It allows to know how the predictions are related to the parameters (also called factors, see Saltelli et al. 2000). It is applied in simulation studies in all kinds of disciplines. Specially, in building thermal simulation field, SA is more and more applied as it can help increase reliability in the predictions of building thermal simulation software (see Lomas & Eppel 1992, Rahni 1997, Aude 1998 or Fürbringer 1999 among others).

The purpose of the present article is to introduce an easy method to identify the most influential factors and evaluate their effects. From one run to another, the parameters are changed according to a sinusoidal oscillation at distinct

frequencies. If the model response is sensitive to a particular parameter, then the modulation of that parameter will tend to induce predictable oscillations in the response variations. Spectral analysis can be used to identify the induced frequencies. Moreover, it is shown that, with such an approach, parameters' effects on the model response variations can be ascertained.

The first section introduces the proposed approach. Then, a brief description of the building thermal model and a confrontation to measurements are achieved in section 2. Section 3 illustrates the application of the sensitivity method to the latter model. An interesting result is the physical interpretation of the most important parameters that reinforces the reliability of the method. At last, future improvements of the proposed method are discussed at the end of the paper.

## 2. The proposed methodology

### 2.1. Description of the method

The method is based on a special sampling of the factors in the frequency domain. Each continuous factor  $X_h$  is sampled as follow :

$$X_h^k = X_h^0 + \theta_h \sin(2\pi f_h u) \quad (1)$$

where  $u = k/N$  and  $u \in \{0, 1/N, 2/N, \dots, (N-1)/N\}$

$X_h$  is the  $h^{\text{th}}$  factor ( $X_h^0$  its nominal value),

$\theta_h$  is the oscillation amplitude, range over which the level settings are changed,

$f_h$  is the *driving frequency* (or main frequency) of factor  $h$ ,

$N$  is the total number of simulation runs,

$k$  is the simulation number.

In the proposed approach, the number of simulation runs  $N$  is equivalent to the sampling frequency ( $f_s$ ) of the factors' value (see fig. 1). The first run gives the base case response

when the factors are at their nominal value. Actually, this approach is a particular case of a more general SA technique called Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) developed by CUKIER et al. (1973).

Let us consider a  $p$  parameter model  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_p)$ .

In case of first order interactions between factors (non-linearity), Mara (2000) shows that :

$$y = \beta_0 + \sum_{h=1}^p \beta_h \sin(2\pi f_h u) + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \beta_{hh'} \sin(2\pi f_h u) \sin(2\pi f_{h'} u) + \varepsilon$$

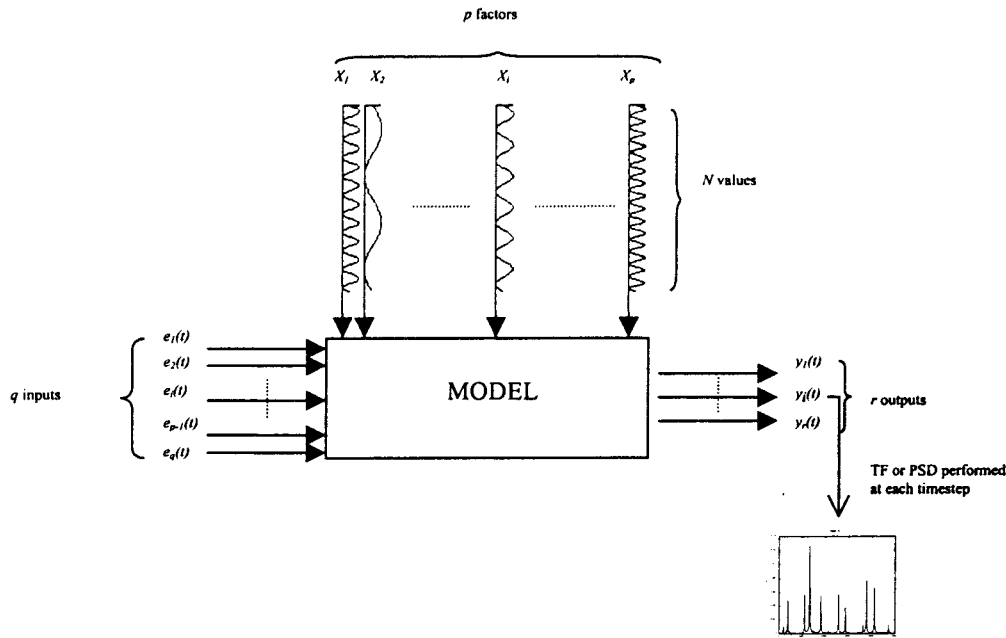
and neglecting the error term  $\varepsilon$ :

$$\Delta y = \underbrace{\sum_{h=1}^p \beta_h \sin(2\pi f_h u)}_{\text{term1}} + \underbrace{\sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{\beta_{hh'}}{2} (-\cos(2\pi(f_h + f_{h'})u) + \cos(2\pi(f_h - f_{h'})u))}_{\text{term2}} \quad (2)$$

$y$  is the response of interest,

### Nomenclature

|   |                                       |                                     |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| $C$ = Node thermal capacitance                          | <b>Greek Symbols</b>                  | $\tau$ = Window's transmittance     |
| $K$ = Node thermal conductance                          | $\alpha$ = Surface absorptance        | <b>Subscripts</b>                   |
| $e$ = Thickness   | $\beta_h$ = Effect of factor $h$      | $i$ = Indoor                        |
| $C_p$ = Specific heat                                   | regression coefficient                | $o$ = Outdoor                       |
| $f_h$ = <i>Driving frequency</i> assigned to factor $h$ | $\delta$ = Dirac function             | $lwo$ = Long-wave radiation         |
| $hc$ = Convective heat transfer coefficient             | $\varphi$ = Heat flux density         | $env$ = Environment (temperature)   |
| $hr$ = Radiative heat transfer coefficient              | $\Gamma$ = Power spectral density     | $sky$ = Sky (temperature)           |
| $T$ = Temperature                                       | $\rho$ = Density                      | $nli$ = Normal incidence            |
| $X$ = Model's factor (or parameter)                     | $\lambda$ = Conductivity              | $si$ = Surface indoor (temperature) |
| $Y$ = Model response                                    | $\sigma_x$ = Variance of variable $x$ | $so$ = Surface outdoor              |



**Fig. 1 Parametric sensitivity analysis of model output. Illustration of the proposed methodology.**

$\beta_0$  is the base case response,

*term1* contains the main effects,

*term2* contains the first order,

$\Delta y = y - \beta_0$  represents the variations of the output, with regard to the base case response, due to the oscillation of the factors' value according to equation (1),

$\beta_h$  is a measure of the effect of factor  $h$  only upon the output.

It is equivalent to the first order regression coefficient in regression analysis,

$\beta_{hh'}$  is the interaction effect of factor  $h$  and  $h'$  ( $h \neq h'$ ) upon the output (non-linearity).

Several inferences can be drawn analysing equation (2) :

- 1) the more a factor is influential, the higher the amplitude of its assigned frequency.
- 2) first order interaction (between two factors) induces two other frequencies which are the sum and the difference of the interacting factors' driving frequencies.

- 3) the induced frequencies may interfere with the original factors' driving frequencies. The latter must be incommensurate to avoid such an interference.
- 4) Nyquist criterion requires that the sampling frequency of the factors' value (in our case, the number of simulation runs  $N$ ) must be at least greater than  $2 \max_{i \in [1,p]}(f_i)$ . The induced frequencies should also respect this criterion.

Qualitative inferences about the relative importance of the factors can be drawn analysing the Fourier transform of  $\Delta y$ . To quantify their effects two methods are available. The first one is an analysis of  $\Delta T$ 's variance and the second one consists in estimating the regression coefficients  $\beta_h$  and  $\beta_{hh'}$ . In fact, as the model is time dependent,  $\Delta y$  is a  $M \times N$  matrix where  $M$  is the number of simulation's timestep (in other words, the length of a simulation). So, evaluation of parameters' influence should be performed at each timestep.

## 2.2. Quantification of the factors' influence

According to equation (2), power spectral density of  $\Delta y$  gives

$$\Gamma_{\Delta y}(f) = \sum_{h=1}^p \frac{\beta_h^2}{4} \delta(f - f_h) + \frac{\beta_h^2}{4} \delta(f + f_h) + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{\beta_{hh'}}{4} \left[ \frac{1}{4} \delta(f - (f_h - f_{h'})) + \frac{1}{4} \delta(f - (f_h + f_{h'})) + \frac{1}{4} \delta(f + (f_h - f_{h'})) + \frac{1}{4} \delta(f + (f_h + f_{h'})) \right]$$

Moreover, the variance of  $\Delta y$  is also defined as

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{\Delta y} df \text{ and the previous equation becomes :}$$

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{h=1}^p \frac{\beta_h^2}{2} + \frac{\beta_{hh'}}{4} \Leftrightarrow 1 = \sum_{h=1}^p \frac{\beta_h^2}{2\sigma_{\Delta y}^2} + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{\beta_{hh'}}{4\sigma_{\Delta y}^2} \quad (3)$$

In equation (3), the ratio  $\beta_h^2/2\sigma_{\Delta y}^2$  is the amount of the variance of  $\Delta y$  explained by factor  $h$  only.

Because *sinus* and *cosinus* are orthogonal functions, the factors' effects can be easily estimated. Indeed, according to equation (2), this property implies that :

$$\beta_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \Delta y \sin(2\pi f_h u) du = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta y \sin(2\pi f_h k/N) \quad (4a)$$

In the same way,

$$\beta_{hh'} = -\frac{4}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta y \cos(2\pi(f_h + f_{h'})k/N) = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta y \cos(2\pi(f_h - f_{h'})k/N) \quad (4b)$$

The main advantage of the latter measure of sensitivity is that it allows to know what happens if a parameter is changed. Indeed,  $\beta_h$  corresponds to the deviation of the output if the value of factor  $h$  is changed to  $X_h + \theta_h$ . An interesting aspect is that verification of the numerical model

can be achieved in part by analysing the sign of the regression coefficients. In effect, the expert (the simulator) generally knows in which direction certain factors affect the model response. If the regression coefficients of those factors, have the wrong sign, this should be a strong indication of an erroneous numerical model (Kleijnen, 1998).

The proposed method based upon a special sampling in the frequency domain allows the estimation of the factors' influence on the model's output. This estimation is unbiased if interferences are avoided. The latter depends upon the choice of the driving frequencies which depends upon the degree of interactions between factors.

## 3. Application to the thermal model of a test cell

The survey concerns a real test cell that was erected at University of Reunion Island for experimental validation of building thermal airflow simulation software (cf. Garde, 1997). After describing the *building* and some model assumptions, we'll apply the methodology introduced in the previous section to identify the most important factors of the model.

### 3.1. Description of the real building

The studied test cell is a cubic-shaped building with a single window on the south wall and a wooden door on the North. All vertical walls are identical and are composed of cement fibre and polyurethane. The roof is made of steel, polyurethane and cement fibre and the floor of concrete slabs, polystyrene. The test cell considered here is well insulated. Base values of each layer's thermal properties are regrouped in the appendix. Fig. 2 shows a picture of the test cell, and on

the left, the weather station that provides solicitations to our model. The case discussed in this paper is a passive one and the split system visible on the picture is switched off.

### 3.2. Model description

A lumped approach (cf. Boyer, 1996) is used to represent the building thermal behaviour. It is based on the analogy between the equation of conduction of Fourier and Ohm's law. Such a model leads to a system of equations, called state equations, which in the matrix formalism has the following form :

$$C \cdot \dot{T} = A \cdot T + B$$

where  $A$  is the state matrix,

$B$  is the solicitations vector,

$C$  is the capacitances matrix,

$T$  is the state vector (temperature),

$\dot{T}$  is the derivative of  $T$ .

In this survey, we consider the electrical/thermal analogy representation of heat transfer conduction through walls (cf. fig. 3) which consists in discretizing a wall with three nodes by layers. Thermal capacitances ( $C_1, C_2, C_3$ ) and thermal

conductances ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ ) of a material are respectively function of its thickness, specific heat, density ( $e, c, \rho$ ) and thickness, conductivity ( $e, \lambda$ ).

### 3.3. Assumptions

The given nodal analysis assumes that heat transfer by conduction through walls are mono-dimensional. Heat flux under the floor is null. Outdoor convective exchange coefficients are based on the correlation of Cole & Sturrock, (1973). Indoor convective exchange coefficients is constant for each wall (see appendix for nominal values). Indoor and outdoor radiation heat transfer are linearized and the radiative exchange coefficients are identical for each wall. Outdoor long-wave radiation heat flux density is written as follow :

$$\phi_{lwo} = hr_{sky} \cdot F_{pc} \cdot (T_{sky} - T_{so}) + hr_{env} \cdot F_{pe} \cdot (T_{env} - T_{so})$$

$F_{pe}, F_{pc}$  are view factors.

Given the diffuse and direct solar radiation incident on unit horizontal surface, the model evaluates the incident short-wave radiation striking each wall. In the same way, window's direct solar transmittance depends on incident angle of direct solar radiation whereas window's diffuse solar transmittance is constant.

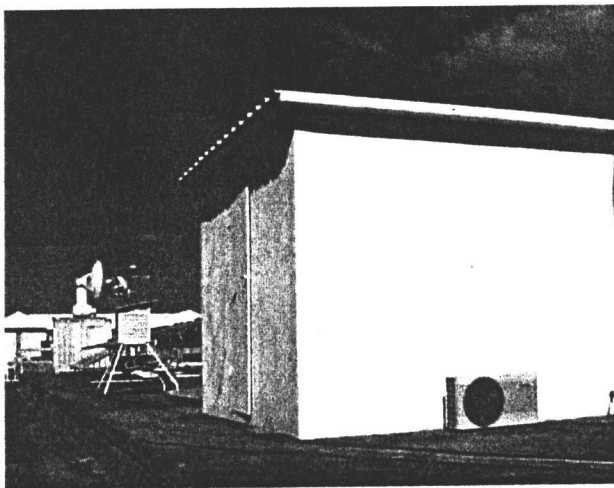


Fig. 2 Picture of the test cell seen from North-West.

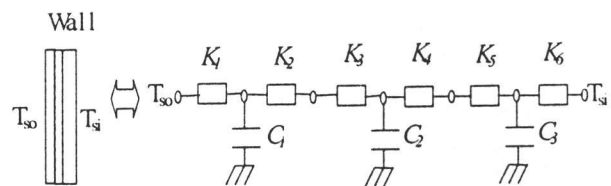
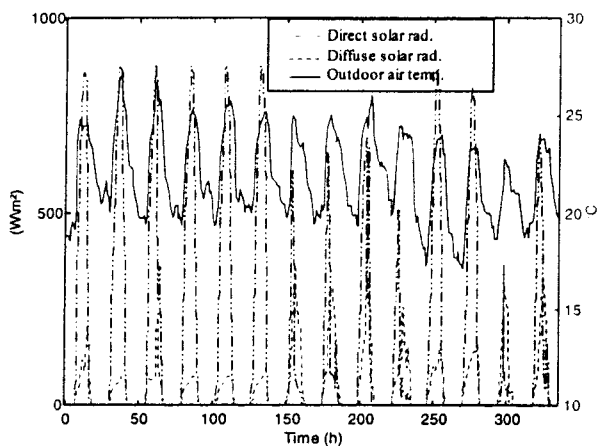


Fig. 3 Representation of the wall spatial discretization.



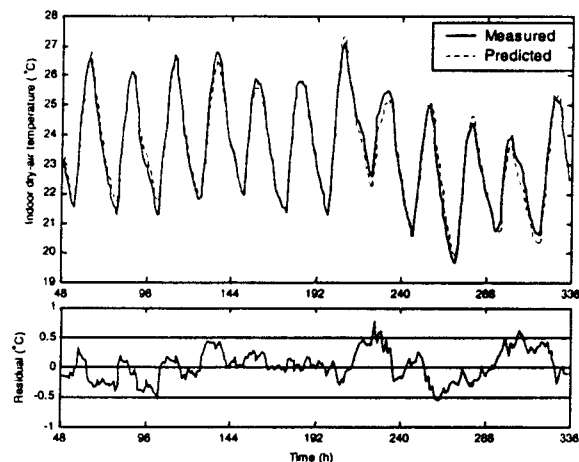
**Fig. 4** Some meteorological solicitations measured during the experiment.

### 3.4. Model's appraisal

A 14 days experiment was carried out in September 1996. The window was on the south wall so that only diffuse solar radiation got into the room. Shaded temperature sensors were placed at three different heights in the center of the room and logged every hour. In the same time, the following weather data were recorded (cf. fig. 4) :

- Outdoor air temperature,
- Relative humidity,
- Horizontal global solar radiation,
- Horizontal solar radiation,
- Wind speed and direction.

Recently, the data set was used to calibrate the model and the methodology applied is described in Mara et al. (2001). The basis for comparison was the average of the three sensors mentioned above which showed little discrepancies. Predictions of the thermal model are in good agreement with



**Fig. 5** Comparison between measurement and prediction of the test cell model. The two first days are taken off because of the warm up period.

experiment as visible on fig. 5 and Table 1. Indeed, the *residual* (measurements - predictions) falls within the measurement uncertainty intervals :  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

**Table 1** Statistical characteristics of the *residual*.

|                    |          |
|--------------------|----------|
| Mean               | 0.028 °C |
| Standard deviation | 0.256 °C |

## 4. Parametric sensitivity analysis of the model

### 4.1. Design of the numerical experiments

Parametric sensitivity analysis of the model is performed using the approach previously described. The 73 parameters are assigned a different driving frequency. The study is carried out so that, for instance, whatever the wall the polyurethane belongs to, the frequency assigned to its conductivity is the same (idem for thickness, density and specific heat).

**Table 2 The thirteen most important parameters and their assigned frequency.**

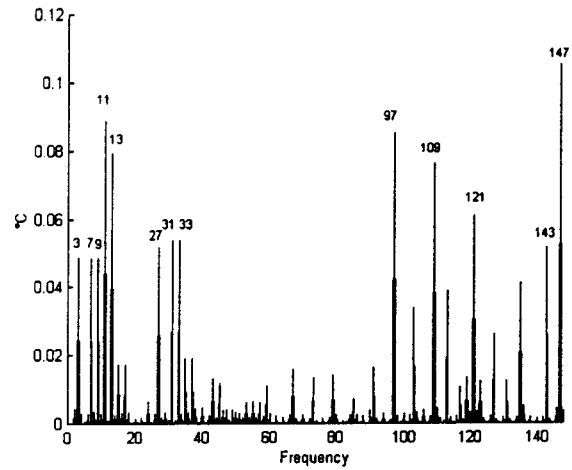
| $f$ | Parameters                                      |
|-----|---|
| 3   | Cement fiber's thickness                        |
| 7   | Cement fiber's specific heat                    |
| 9   | Cement fiber's density                          |
| 11  | Polyurethane's thickness                        |
| 13  | Polyurethane's thermal conductivity             |
| 27  | Heavyweight concrete slabs' thickness           |
| 31  | Heavyweight concrete slabs' specific heat       |
| 33  | Heavyweight concrete slabs' density             |
| 97  | Area of the floor                               |
| 109 | Area of the window                              |
| 121 | $hr_{sky}$                                      |
| 143 | Outdoor surface absorptance of the door         |
| 147 | Transmittance of the window at normal incidence |

To identify first order interactions easily, only odd integer values are chosen as driving frequencies. Indeed, in this way, frequencies induced by first order interactions are even values and can not interfere with main frequencies. Consequently,  $f_h \in \{3, 5, \dots, 147\}$ ,  $h \in [1, 73]$  and the study requires 296 ( $=2\max(f_h) + 2$ ) simulation runs. Each factor is varied *sinusoidally* by  $\pm 10\%$  around its nominal value.

In the following study, we are looking for the most important parameters for the predicted indoor air temperature during the experiment described previously. So, once a simulation takes end, we calculate :

$$\Delta T_{i,k} = T_{i,base} - T_{i,k}$$

where  $T_{i,base} = \beta_0(t)$  is the indoor air temperature obtained with the factors nominal value at time  $i$ , and  $T_{i,k}$  the indoor air temperature obtained with the  $k^{\text{th}}$  simulation at time  $i$ .



**Fig. 6 Superposition of all the Fourier Transforms performed at each timestep of indoor air temperature's variations ( $\Delta T$ ).**

#### 4.2. Results analysis

As exposed in section 2, analysis of the Fourier transform of  $\Delta T_i$  allows to identify the most influential parameters at time  $i$ . As the three-dimensional (time, frequency, amplitude) graph is not easy to exploit, the whole spectra are superposed on fig. 6. The latter clearly allows to identify the driving frequencies. Only a few of them have high amplitude and consequently are really important. Table 2 contains the identified influential parameters and their assigned frequency. Interactions are negligible as the spectrum contains no significant even frequencies.

The effects of the most important parameters are ascertained first according to equation (3). The information obtained correspond to the hourly amount of the variance of  $\Delta T$  due to each factor. Fig. 7 shows the hourly decomposition the ninth day which was a cloudy day (see fig. 4).



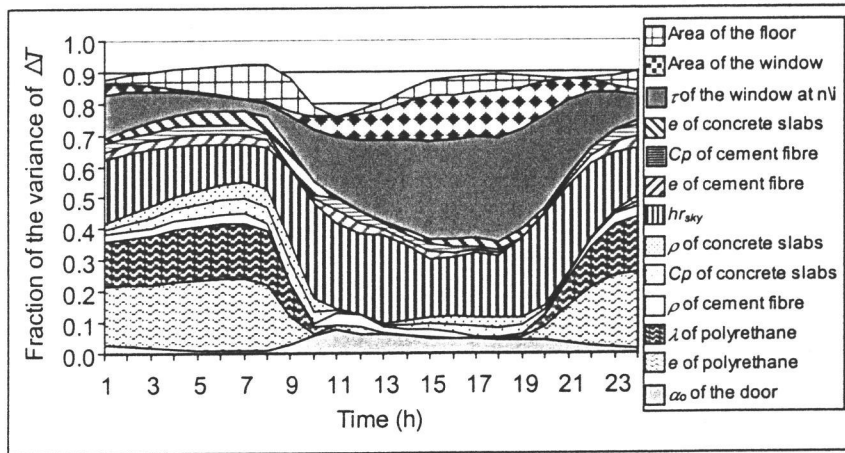


Fig. 7 Influence of the eleven most important factors the ninth day. Analysis of  $\Delta T$ 's variance.

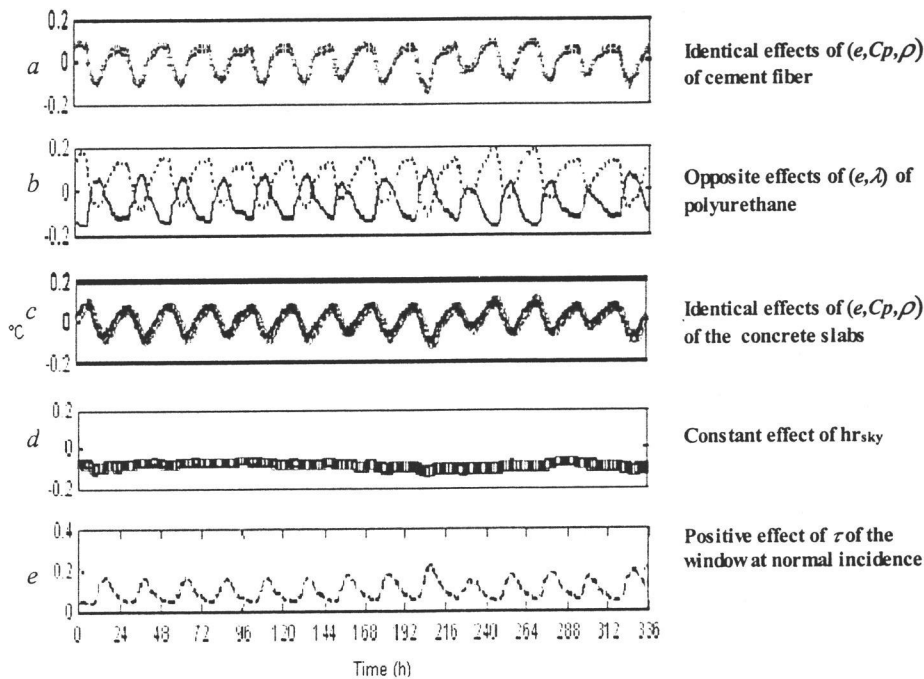


Fig. 8 Effects of some important factors. Influence of the thermal capacitance of heavyweight materials and the thermal conductance of insulating materials.

These thirteen parameters explain between 80 to 90% of the total variation of  $\Delta T$ . The remaining amount should be explained by the low effects of the 59 other factors and interactions. Influence of the window's transmittance at normal incidence is preponderant during day time and progressively disappears in the night. On the contrary, effects

of polyurethane's thickness and thermal conductivity are high during the night and low in the day time. The relative contribution of those two parameters on indoor air temperature are similar. Let us also note that the contribution of outdoor radiative heat transfer coefficient ( $hr_{sky}$ ) is constant

The main drawback of the previous measure of parameters' influence is that prediction of the model response for a new set of parameters is impossible. This can be achieved by estimating the regression coefficients  $\beta_h(t)$  according to equation (4a). Indeed, in our study, adding  $\beta_h(t)$  to the base case response corresponds to the new response of the model if parameter  $X_h$  is increased by 10%. The hourly regression coefficients of the most influential factors are plotted on fig. 8. We can notice that the effects of the cement fibre's thickness, density and specific heat are identical and idem for the concrete slabs' thermal properties. In the contrary, effects of polyurethane's thickness and thermal conductivity are opposite. The effect of  $hr_{sky}$  is effectively almost constant ( $\sim -0.1^\circ\text{C}$ ) and it can be inferred from fig 8.d that an increase by 10% of this coefficient will decrease predicted indoor air temperature by almost  $0.1^\circ\text{C}$  (the previous predicted curve visible on fig. 5 is shifted down).

At last, it is interesting to notice that, according to fig. 8e, an increase of the window's transmittance at normal incidence will increase the predicted indoor air temperature. This increase is high during the day time and can reach  $0.2^\circ\text{C}$  but is very low the night. In fact, if the effect of the latter parameter was negative this should have been an indication of its erroneous numerical implementation (physically an increase of  $\tau_{Ni}$  can not decrease the indoor air temperature).

#### 4.3. Results interpretation

Physically,  $(\rho, C_p, e)$  of a material represent its thermal capacitance whereas  $(e, \lambda)$  represent its thermal conductance. So, one can note that predicted indoor air temperature is sensitive to the thermal capacitances of the cement fibre and

heavyweight concrete slabs whereas the thermal conductance of the polyurethane is an important factor for this response. This result is not surprising as thermal inertia is the main feature of heavyweight concrete and cement fibre whereas thermal conductance characterizes insulating materials like polyurethane.

Moreover, the fact that the effects of heavyweight concrete's thickness, density and specific heat are identical is due to the definition of materials' capacitance :  $C_{th} = e\rho C_p$ . Hence, an increase by the same amount of one of these three parameters will have the same impact on the thermal capacitance. As far as thermal conductance is concerned, it is defined as :  $R_{th} = e/\lambda$ . Consequently, thickness and thermal conductivity of insulating materials have opposite effects on thermal conductance.

The fact that window's transmittance at normal incidence is the most important factor is not surprising as it is the main heat source (the test cell 's walls are insulated). The constant effect of outdoor radiative heat transfer coefficient with the fictive sky temperature is explained by the linearization of outdoor radiative heat transfer (see § 3.3).

## 5. Conclusion

We have introduced a new method to perform sensitivity analysis. An application in building thermal simulation is given showing that among the whole set of parameters, only a few are really influential. This means that, concerning the studied model, the latter have to be known accurately to obtain reliable predictions. Moreover, one of the most interesting results is that the parameters' effects can be physically interpreted. SA also permits a diagnostic of the

building. This survey, also demonstrates that SA can pinpoint the weaknesses of the model. Indeed, sensitivity of indoor air temperature to the model of radiative heat transfer with the sky incites us to use a higher level model instead of the linearized one.

At last, as regard to the results obtained, the number of parameters (and consequently the total number of simulation runs) can be reduced. Indeed, SA can be performed by taking into account only materials' thickness and conductivity. This comes down to analyze the influence of their capacitance and conductance. Hence, conductance would be deemed influential if the model is sensitive to both thickness and conductivity. Capacitance would be deemed influential if only thickness is important. Actually, effect of thermal capacitance is the difference between effect of thickness and effect of conductivity.

## 6. Perspective

The first inconvenient of the proposed SA method is the required number of simulation runs (in our case, four times the number of parameters). A second disadvantage is that the approach can not be extended to the building solicitations which are time variant. To overcome these two problems an idea consists in oscillating all the factors (including the solicitations) throughout the simulation. With such an approach, only one simulation run is necessary and the assigned frequencies are function of time.

This approach is known as frequency domain experimentation (FDE) and was introduced first by Schröben and Cogliano (1981). One drawback of FDE is that the building thermal behavior is similar to a low-pass filter.

Consequently, an influential factor could be deemed as non important because its assigned driving frequency is filtered. Anyway, it is expected that such a method can be improved and will efficiently allow to identify important factors faster than the method introduced in the present article.

## Acknowledgements

The authors are indebted to Pr. J.P.C Kleijnen of *Tilburg University* and J. Neymark for their comments on earlier version of the manuscript. The financial contribution of *Conseil Régional de La Reunion* to this study is gratefully acknowledged.

## References

- Aude P., Beghein C., Depecker P., Inard C., 1998, "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, Iss. 2. pp. 139-164.
- Boyer H., Chabriet J. P., Grondin-Perez B., Tourrand, C., Brau, J., 1996, "Thermal Building Simulation and Computer Generation of Nodal Models", *Building and Environment*, Vol. 31, N°3. pp. 207-214.
- Cukier R. I., Fortuin C. M., Schuler K. E., Petschek, A.G. & Schaibly, J.H, 1973, "Study of the Sensitivity of Coupled Reaction Systems to Uncertainties in Rate Coefficients, Part I Theory", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 59, pp. 3873-3878.
- Fürbringer J.M.. & Roulet C.A., 1999, "Confidence of Simulation Results : Put a SAM in your Model. The IEA-ECBCS Annex 23 Experience of Model Evaluation", *Energy & Buildings*, Vol. 30, pp.61-71.

- Garde, F., 1997, "Validation et développement d'un modèle thermo-aéraulique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes", *PhD. Thesis*, University of La Reunion, France, pp. 110.
- Kleijnen, J.P.C., 1998, "Experimental Design for Sensitivity Analysis, Optimization and Validation of Simulation Models", *Handbook of Simulation*, Jerry Banks Editor, Wiley N.Y, ISBN 0-471-13403-1, pp. 209-210.
- Lomas K. & Eppel H., 1992, "Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs", *Energy and Buildings* Vol. 19, pp. 21-44.
- Mara T.A., 2000, "Contribution à la validation d'un logiciel de simulation thermo-aéraulique du bâtiment : Proposition de nouveaux outils d'aide à la validation", *PhD. Thesis*, University of La Reunion, France, pp. 117-118.
- Mara, T.A., Garde, F., Boyer, H. & Mamode, M., 2001, "Empirical Validation of the Thermal Model of a Passive Solar Cell Test", *Energy & Buildings*, to be published.
- Rahni, N., Ramdani N., Czndzu Y. & Dalicieux, P., 1997, "Application of Group Screening to Dynamic Building Energy Simulation Models", *J. Statist. Comput. Simul., Vol. 57*, pp. 285-304.
- Saltelli, A., Andres, T.H, & Homma, T. (2000) : "Sensitivity analysis of model output. Performance of the iterated fractional factorial design method", *Computational Statistics & Data Analysis*, pp. 387-407.
- Schruben, L.W. & Cogliano, V.J., 1981, "Simulation Sensitivity Analysis : A Frequency Domain Approach". *Proceedings of Winter simulation conferences*, Atlanta, pp. 455-459.

