



**HAL**  
open science

# Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles.

Harry Boyer

## ► To cite this version:

Harry Boyer. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles.. Mécanique [physics.med-ph]. INSA de Lyon, 1993. Français. NNT: . tel-00757022

**HAL Id: tel-00757022**

**<https://theses.hal.science/tel-00757022v1>**

Submitted on 26 Nov 2012

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

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

# THESE

*présentée*

DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

*pour obtenir*

LE GRADE DE DOCTEUR

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET SCIENCES DE LA CONCEPTION

PAR

**Harry BOYER**

Ingénieur de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier

## **Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles.**

Soutenu le 13 décembre 1993 devant la commission d'examen

Jury	MM. J. LEVEAU	<i>Président</i>
		<i>Professeur à l'Université de la Réunion</i>
	J. BRAU	<i>Professeur à l'INSA de Lyon</i>
	P. DEPECKER	<i>Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon I</i>
	J.C. GATINA	<i>Professeur à l'Université de la Réunion</i>
	P. HERVE	<i>Professeur à l'Université de la Réunion</i>

J.C. MATHIEU

*Directeur E.D.F. Réunion*

G. MENGUY

*Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon I*

# INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

**Directeur** : J. ROCHAT

**Professeurs** :

S. AUDISIO	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
J.C. BABOUX	TRAIT. SIGNAL ULTRASONS
J. BAHUAUD	MECANIQUE DES SOLIDES
B. BALLAND	PHYSIQUE DE LA MATIERE
G. BAYADA	CENTRE DE MATHEMATIQUES
C. BERGER (Melle)	PHYSIQUE INDUSTRIELLE
M. BETEMPS	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
C. BOISSON	VIBRATIONS ACOUSTIQUES
M. BOIVIN	MECANIQUE DES SOLIDES
H. BOTTA	GENIE CIVIL ET URBANISME (METHODES)
G. BOULAYE	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
J. BRAU	EQUIPEMENT DE L'HABITAT
M. BRUNET	MECANIQUE DES SOLIDES
J.C. BUREAU	THERMOCHIMIE MINERALE
J.P. CHANTE	COMPOSANTS DE PUISSANCE ET APPLICATIONS
M. CHEVRETON	ETUDE DES MATERIAUX
B. CHOCAT	METHODES
B. CLAUDEL	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
L. CRONENBERGER	CHIMIE BIOLOGIQUE
M. DIOT	THERMOCHIMIE MINERALE
A. DOUTHEAU	CHIMIE ORGANIQUE
B. DUPERRAY	CHIMIE BIOLOGIQUE
H.EMPTOZ	MOD. SYST. ET REC. DES FORMES

C. ESNOUF	GEMPPM*
L. EYRAUD	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
G. FANTOZZI	GEMPPM*
J. FAUCHON	CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
J. FAVREL	INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUS.
Y. FETIVEAU	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
L. FLAMAND	MECANIQUE DES CONTACTS
P. FLEISCHMANN	GEMPPM*
A. FLORY	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
R. FOUGERES	GEMPPM*
L. FRECON	DEVELOP. LANGAGES INFORMAT. AVANCES
R. GAUTHIER	PHYSIQUE DE LA MATIERE
M. GERY	GENIE CIVIL ET URBANISME (EQUIPEMENT DE L'HABITAT)
G. GIMENEZ	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
P. GOBIN	GEMPPM*
M. GODET	MECANIQUE DES CONTACTS
P. GONNARD	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
R. GOUTTE	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
G. GRANGE	GENIE ELECTRIQUE
G. GUENIN	GEMPPM*
G. GUILLOT	PHYSIQUE DE LA MATIERE
A. GUINET	INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUS.
C. GUITTARD	DEVELOP. LANGAGES INFORMAT. AVANCES
J.L. GUYADER	VIBRATIONS - ACOUSTIQUE
R. HENRY	MECANIQUE DES STRUCTURES
J. JOUBERT	GENIE MECANIQUE
J.F. JULLIEN	BETONS ET STRUCTURES
A. JUTARD	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
R. KASTNER	GEOTECHNIQUE
H. KLEIMANN	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE

J. KOULOUMDJIAN	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
M. LAGARDE	CHIMIE BIOLOGIQUE
M. LALANNE	MECANIQUE DES STRUCTURES
A. LALLEMAND	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
M. LALLEMAND (Mme)	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
P. LAREAL	GENIE CIVIL ET URBANISME (GEOTECHNIQUE)
A. LAUGIER	PHYSIQUE DE LA MATIERE
CH. LAUGIER	PHYSIOLOGIE ET PHARMACODYNAMIE
P. LEJEUNE	GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
C. LESUEUR	VIBRATIONS - ACOUSTIQUE
Y. MARTINEZ	INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUST.
C. MARTY	CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
J. MERLIN	GEMPPM*
H. MAZILLE	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
M. MIRAMOND	METHODES
N. MONGEREAU	GENIE CIVIL (GEOTECHNIQUE)
R. MOREL	MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUES
P. NARDON	BIOLOGIE
A. NAVARRO	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
M. OTTERBEIN	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
J.P. PASCAULT	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
J. PERA	SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
G. PERACHON	THERMOCHIMIE MINERALE
M. PERDRIX	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
J. PEREZ	GEMPPM*
P. PINARD	PHYSIQUE DE LA MATIERE ET PHYSIQUE INDUSTRIELLE
D. PLAY	CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
P. PREVOT	INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUST.
R. REYNAUD	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
J.M. REYNOUARD	BETONS ET STRUCTURES

M. RICHARD	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
E. RIEUTORD	MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
J. ROBERT-BAUDOUY	(Mme) GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
J. ROBIN	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
D. ROUBY	GEMPPM*
J.F. SACADURA	MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
H. SUTEREAU	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
S. SCAVARDA	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
F. STOEBER	GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
M. TROCCAZ	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
J. TUSET	SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
R. UNTERREINER	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
P. VERMANDE	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
J. VERON	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
A. VINCENT	GEMPPM*
P. VUILLERMOZ	PHYSIQUE DE LA MATIERE

**Directeurs de recherche C.N.R.S. :**

P. CLAUDY	THERMOCHIMIE MINERALE
M. MURAT	GEMPPM*
A. NOUAILHAT	PHYSIQUE DE LA MATIERE
M.A. MANDRAND (Mme)	GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES

**Directeurs de recherche I.N.R.A. :**

G. BONNOT	BIOLOGIE
S. GRENIER	BIOLOGIE
Y. MENEZO	BIOLOGIE

## Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :

A - F. FRIGENT (Mme) CHIMIE BIOLOGIQUE

N. SARDA (Mme) CHIMIE BIOLOGIQUE

\* GROUPE D'ETUDE METALLURGIE PHYSIQUE DES MATERIAUX

## Avert Propos

Ce travail a été réalisé entre deux laboratoires distants géographiquement de près de 10000 kilomètres, à savoir le *Laboratoire de Génie Industriel* de L'Université de La Réunion et l'*Equipe Equipement de l'Habitat* du Centre de Thermique de l'INSA de Lyon (CETHIL, URA CNRS 1372). Rapprochés cependant par la préoccupation scientifique de ce travail de thèse, cette particularité explique à elle seule le nombre de personnes qui mériteraient place dans ce préambule. Je ne pourrais toutes les citer, mais je remercie vivement

Messieurs les Professeurs M. GERY et J. LEVEAU, pour le sympathique accueil qu'ils m'ont réservé, respectivement au CETHIL et au sein du Département de Physique de l'Université de La Réunion,

Messieurs les Professeurs J. BRAU et J.C. GATINA, qui ont tous deux initié et guidé ce travail tout au long de son avancement. En plus d'un sujet passionnant, de leurs conseils et encouragements, ils m'ont procuré un cadre de travail fait de confiance, de liberté et de stimulation intellectuelle,

Monsieur P. DEPECKER, Professeur à l'Université de Lyon I, qui m'a fait bénéficier de précieux conseils et Monsieur le Professeur G. MENGUY, Professeur et Directeur du *Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires* de l'Université Claude Bernard de Lyon. Ils ont tous deux aimablement accepté de rapporter ce mémoire, de même que Monsieur GATINA.

Monsieur le Professeur P. HERVE, Président de l'Université de la Réunion, dont la présence à ce jury m'honore particulièrement, faisant par ailleurs partie avec Messieurs GATINA et LEVEAU de l'équipe enseignante ayant guidé mes premiers pas en physique dans cette même université,

Monsieur J.C. MATHIEU, Directeur Régional d'EDF Réunion, dont la participation à ce jury marque le rôle majeur d'Electricité de France dans le domaine des économies d'énergies,

Monsieur P. LAURET, Ingénieur, sans l'enthousiasme et la compétence de qui l'important travail de développement informatique sous jacent à cette thèse n'aurait pu être mené à bien,

Le Conseil Régional ainsi que l'ADEME pour leurs concours financiers.

Enfin, il m'est agréable d'adresser ma sympathie à l'ensemble du personnel du Département Physique de l'Université de La Réunion et du Laboratoire Equipement de l'Habitat de l'INSA de Lyon, lequel a contribué à créer un climat propice à la réalisation de ce travail. A ce titre, qu'il me soit permis de remercier J.P. CHABRIAT, Maître de Conférences à l'Université de La Réunion et P. SCHNEIDER, Doctorant à l'INSA.



## Résumé

Situant le niveau d'approche des praticiens de l'habitat, le premier chapitre applique l'analyse systémique à la conception thermique. La décomposition résultante du bâtiment fait alors apparaître le sous-système zone thermique et jette les bases de la description de l'objet à étudier. L'état de l'art (et de l'offre logicielle) est ensuite abordé, révélant certaines demandes non satisfaites. Nous avons alors été amenés à définir le cahier des charges de notre travail, à savoir celui d'un outil multi-modèles de simulation détaillée et d'aide à la conception thermique de bâtiments multizones, intégrant en particulier les aspects aérauliques.

Les chapitres II et III, traitant des modèles hygro-thermique et aéraulique, rappellent les hypothèses physiques, simplifications et modèles des phénomènes et explicitent nos choix d'intégration. En plus des modèles simplifiés classiques, certains modèles détaillés sont passés en revue, leur intégration à un code de calcul étant maintenant envisageable en raison de l'accroissement de la puissance disponible sur les machines de bureau. Vis à vis du compromis entre temps de calcul et précision, un modèle conductif original, anamorphose, est présenté et intégré. Désireux d'élargir le notre champ d'application au-delà du seul climat tempéré, une attention particulière est alors accordée aux échanges radiatifs entre l'enveloppe du bâtiment et l'extérieur. Par ailleurs, en raison d'un couplage aéraulique avec l'extérieur particulièrement important en climat tropical, une présentation détaillée des approches de modélisation des transferts d'air est effectuée. Avec l'intégration des grandes ouvertures et notre choix d'un modèle en pression, l'accent est mis sur les problèmes numériques alors rencontrés.

Fruit de l'analyse conceptuelle et physique de l'objet bâtiment, l'architecture de l'outil logiciel, baptisé *CODYRUN*, fait l'objet du chapitre IV. L'environnement choisi et l'interface développée l'ont été en vue de faciliter sa diffusion ultérieure auprès de professionnels. L'organisation informatique est alors explicitée. La structure des données liées au bâtiment est explicitée et s'avère être complexe en raison de la diversité des situations pouvant être décrites (nombre de zones, constitution de l'enveloppe, intégration de systèmes, ...). Par ailleurs, en raison de la prise en compte simultanée des transferts thermiques, aérauliques et d'humidité, et du caractère novateur multi-modèle, il est nécessaire de détailler indépendamment l'algorithmique de chacune des parties et celle des procédures de couplage choisies.

Des illustrations du logiciel et de notre approche de sa validation constituent le dernier chapitre. La démarche adoptée pour la validation est progressive et confirme l'importance des tests en régime permanent, pour chacun des aspects hygro-thermique et aéraulique. Avec successivement des comparaisons avec un autre code de calcul, la confrontation avec des mesures et des vérifications analytiques, une certaine fiabilité de la modélisation effectuée est manifeste. D'autres illustrations sont proposées, à savoir une étude de sensibilité à la répartition spatiale des sollicitations de courte longueur d'onde et l'illustration de l'intérêt numérique de l'application sélective des modèles, dans le cas de la convection intérieure.

# Abstract

Establishing the level of approach of the building professionals, the first chapter applies the systemic analysis to the thermal design of buildings. The consequence of the splitting up of the building makes evident the sub-system thermal zone and lays the foundations of our description of a building. The state of art (and the software offer) is then tackled, revealing some schedule of conditions of our work i.e. the one of a detailed simulation tool and of a tool useful for the design of multizone buildings thermal design, integrating in particular airflow aspects.

The chapters II and III about the thermal, humidity and airflow models, recall physical hypotheses, simplifications and models of phenomenons as well as they explain our choices as far as integration is concerned. In addition to the classic simplified models, some detailed models are reviewed, their integration to a reckoning code being now conceivable due to the increase of the available power of today's microcomputers. As far as the compromise between reckoning time and precision, an original conductive model, anamorphosis, is displayed and integrated. Desirous of enlarging the application field beyond the sole temperate climate, particular attention is granted to radiation exchanges between the covering of the building and the outside as well as the airflow transfers. Besides, owing to the airflow patterns coupling with the outside particularly important within a tropical climate, a detailed presentation of airflow calculation models is done. With the integration of wide openings and our choice of a pressure model, the stress is put on the numerical problems thus encountered.

Result of the conceptual and physical analysis of the building, the architecture of the software called *CODYRUN* is covered by chapter IV. The chose of the environment and the development of an interface have been made in order to make easier its subsequently distribution nearby professionals. The calculation process and organisation is then explained. The data structures linked to the building are displayed and turn on to be complex due to the diversity of the situations that can be described (the number of zones, the constitution of the covering of the building, the integration of systems, ...). Besides, owing to the simultaneous taking into account of thermal, airflow and humidity transfers as well as the multiple model innovator feature, it is necessary to detail apart the calculation process of each one of the parts and that of the coupling procedures chosen.

The last chapter will deal with illustrations of the software and of our approach of its validation. The process adopted is progressive and confirms the importance of tests in steady state, for each one of the thermal, airflow patterns and humidity models. With successively comparisons with another simulation code, the confrontation with measures and analytic checks, a reliability of the modelling done is obvious. Other illustrations are proposed, i.e. a sensibility analysis to the spatial distribution of the outdoor short wave radiation and the illustration of the numerical interest of the selective use of models, in the case of the indoor convection.

## Nomenclature

$a$	diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$A$	matrice	
$B$	vecteur	
$T$	température	[K]
$C$	chaleur massique du matériau	[J/kg.K]
$C_p$	coefficient de pression	
$CI$	charge interne	[W]
$e$	épaisseur	[m]
$E$	éclairage de courte longueur d'onde	[W/m <sup>2</sup> ]
$F$	facteur de forme	
$g$	vecteur accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$Gr$	nombre de Grashof	
$h$	coefficient d'échange	[W/m <sup>2</sup> .K]
$H$	enthalpie	[J]
$\dot{H}$	débit enthalpique	[W]
$\vec{j}$	vecteur densité de courant électrique	[A/m <sup>2</sup> ]
$J$	radiosité	[W/m <sup>2</sup> ]
$K$	conductance thermique	[W/m <sup>2</sup> .K]
$lv$	chaleur latente de vaporisation de l'eau	[J/kg eau]
$m$	masse	[kg]
$\dot{m}$	débit massique entre deux côtes	[kg/s]
$M^0$	émittance totale du corps noir	[W/m <sup>2</sup> ]
$Nu$	nombre de Nusselt	
$P$	pression	[Pa]
	puissance liée à un système de traitement d'air	[W]
$Pr$	nombre de Prandtl	
$\dot{Q}$	débit massique entre deux zones	[kg/s]
$rs$	humidité spécifique	[kg eau / kg air sec]
$S$	aire	[m <sup>2</sup> ]
$s$	angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale	[degrés]
$t$	temps	[s]
$v$	vitesse du vent	[m/s]
$\vec{v}$	vecteur vitesse	
$V$	potentiel électrique	[V]
$z$	côte	[m]

## Caractères grecs :

$\alpha$	absorptivité	
$\delta$	déclinaison du soleil	[degrés]
$\Delta$	opérateur laplacien	
$\Delta$	écart, différence	
$\varepsilon$	émissivité	
$\varphi$	densité de flux	[W/m <sup>2</sup> ]
$\phi$	flux	[W]
$\lambda$	conductivité thermique	[W/m.K]
$\theta$	paramètre du schéma de résolution	
$\rho$	réflectivité	
	masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
	résistivité électrique	[ $\Omega$ .m]
$\sigma_0$	constante de Stefan-Boltzmann	5,67 10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$\tau$	transmissivité	

## Indices :

<i>a</i>	air	<i>lwe</i>	rayonnement de grande longueur d'onde extérieur
<i>as</i>	air sec		
<i>ae</i>	air extérieur	<i>r</i>	rayonnement
<i>ai</i>	air intérieur	<i>rm</i>	radiante moyenne
<i>cond</i>	conduction	<i>s</i>	spécifique
<i>c</i>	ciel	<i>se</i>	surface extérieure
<i>cv</i>	convection	<i>sens</i>	sensible
<i>cve</i>	convection extérieure	<i>si</i>	surface intérieure
<i>cvi</i>	convection intérieure	<i>sor</i>	sortant
<i>ent</i>	entrant	<i>sw</i>	rayonnement de courte longueur d'onde
<i>lat</i>	latent		
<i>g</i>	global	<i>swe</i>	rayonnement de courte longueur d'onde extérieur
<i>h</i>	horizontal		
<i>i,j</i>	concernant les entités i et j	<i>swi</i>	rayonnement de courte longueur d'onde intérieur
$\lambda$	monochromatique		
<i>lw</i>	rayonnement de grande longueur d'onde	<i>v</i>	vapeur d'eau
		<i>vmc</i>	ventilation mécanique contrôlée
<i>lwi</i>	rayonnement de grande longueur d'onde intérieur		

# Sommaire général

Introduction	19
Chapitre I : Modélisation et bâtiment	21
La modélisation	
L'application à la thermique des bâtiments	
L'état de l'art	
Notre cahier des charges	
Chapitre II : Le modèle hygro-thermique	51
La conduction	
La convection	
Le rayonnement	
Les transferts d'humidité	
L'assemblage et la résolution du problème thermique	
Chapitre III : Le modèle aéraulique	109
Les effets moteurs	
Modèle aéraulique en pression	
Problématique des grandes ouvertures	
La résolution du système non linéaire en pression	
Aspects numériques	
Chapitre IV : Architecture informatique de <i>CODYRUN</i>	147
Le cahier des charges informatique	
La description hiérarchique du bâtiment	
Organisation du module thermique	
Organisation du module aéraulique	
Organisation du module hydrique	
Chapitre V : Illustrations et validation du logiciel	183
La problématique de la validation des logiciels	
Amorce de la validation de <i>CODYRUN</i>	
Illustrations du logiciel	
Conclusion	223
Bibliographie	227
Annexes	239





*A nos parents*

# Introduction

La crise énergétique mondiale de 1973 a mis en évidence l'importance des consommations des différents types d'énergie et a été en France le moteur de la première réglementation thermique des bâtiments de 1974. Une réduction de 25 % des consommations du secteur résidentiel et tertiaire (42 % de l'énergie primaire consommée en 87) était alors observée, tendance reproduite lors des nouvelles réglementations de 1982 et de 1989 [Pouget 88], [Greff 89]. Cependant, les nouvelles exigences de confort et la croissance du parc immobilier, dont les 4/5 ont été construits avant la crise de l'énergie, font apparaître un gisement encore important d'économies réalisables. La préoccupation des concepteurs de réduire la consommation énergétique et d'obtenir une meilleure qualité thermique des ambiances a favorisé la mise au point de nombreux logiciels simulant le comportement dynamique des bâtiments.

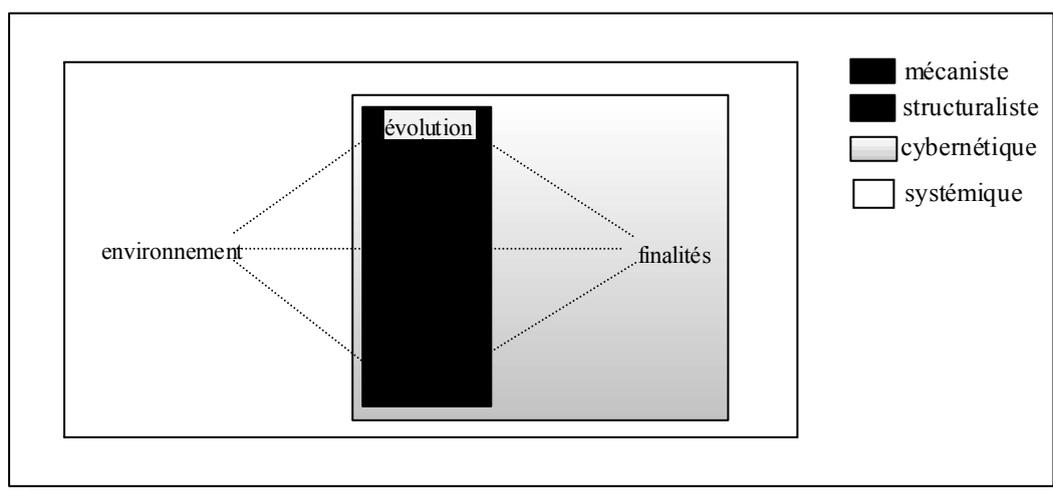
Historiquement, des difficultés sont alors apparues, liées à la modélisation des phénomènes, de leur couplage, ou de l'adaptation aux différents climats. Vis à vis de ce dernier point, en raison d'un environnement climatique effectivement plus favorable, il est à noter que les Départements et Territoires d'Outre-Mer (tel que l'île de la Réunion) ont été exclus des réglementations précédentes, initialement axées sur le problème de la consommation de chauffage. Sous ces climats tropicaux, en lieu et place d'un habitat traditionnel particulièrement bien adapté au climat, l'importation de modèles de construction en provenance de la métropole a conduit à des réalisations thermiquement aberrantes, du point de vue énergétique ou vis à vis du confort thermique. Depuis, en raison d'une certaine prise de conscience, les concepteurs intègrent du mieux possible les aspects liés au climat dans leurs réalisations, le but ultime étant alors de promouvoir l'habitat passif. Leur tâche n'est cependant pas aisée, à cause de certaines difficultés telles que la prise en compte de la ventilation naturelle. Sur un aussi petit département que la Réunion, 2512 km<sup>2</sup>, la variété des micro climats rencontrés, nécessitant par exemple le recours au chauffage des habitations en zone de montagne, est une autre source de difficultés.

Pour la thermique générale comme pour d'autres disciplines, les progrès spectaculaires de l'informatique sont l'un des événements ayant le plus apporté au domaine. En thermique des

bâtiments, cet aspect a tout d'abord conduit à l'automatisation des méthodes de calcul des coefficients réglementaires. Au fur et à mesure de son évolution, cette réglementation a harmonisé le niveau plancher des performances énergétiques. Cependant, cette seule contrainte juridique ne répond pas à tous les problèmes rencontrés par les multiples acteurs de ce domaine, problèmes d'ordre technico-économique ou encore liés au confort. Guidés par des efforts de recherche internationaux sur le thème de l'énergie solaire, des progrès importants ont été réalisés dans la compréhension des mécanismes énergétiques de la physique du bâtiment. Avec l'utilisation rationnelle de l'énergie solaire dans l'habitat, la démarche bio climatique était née et les premiers outils d'aide à la conception ont alors vu le jour, incités en cela par la réglementation de 1982 intégrant les apports gratuits. Les progrès dans la modélisation des phénomènes et leur transfert dans le domaine professionnel ont alors conduit à plusieurs approches numériques, allant de l'instrument de conception à l'usage de l'architecte à l'outil de laboratoire dédié à l'expert thermicien. Dans cette analyse, chaque approche tend à répondre aux besoins spécifiques d'un type d'acteur du processus de conception énergétique du bâtiment.

Notre objectif est sensiblement différent et est celui d'un outil utilisable sous différents climats, aussi bien lors de l'avant projet sommaire, en cours de réalisation et finalement à des fins d'audit énergétique de l'ensemble construit. Pour chacun de ces cas, les objectifs de résultat, la précision désirée et le temps de réponse sont autant d'éléments différents appelant une modélisation détaillée et paramétrable du système bâtiment.

# I. Chapitre I : Modélisation et bâtiment



*Fig. 1 : Les pôles de définition des paradigmes de la modélisation*



1.1. Introduction.....	24
1.2. La modélisation :.....	25
1.2.1. Quelques repères sur les méthodes de modélisation :.....	25
1.2.1.1. Le paradigme Systémique :.....	26
1.2.1.2. Le Système Général :.....	26
1.2.2. La modélisation systémique :.....	28
1.2.2.1. L'outil ou systémographe :.....	28
1.2.2.2. La démarche :.....	29
1.2.3. Les buts poursuivis :.....	30
1.3. L'application à la thermique des bâtiments :.....	30
1.3.1. Une typologie des besoins en logiciels thermiques .....	31
1.3.2. La modélisation thermique des bâtiments :.....	34
1.3.2.1. Le choix d'une catégorie de modèles :.....	34
1.3.2.2. Application de la méthode analytique :.....	35
1.3.2.2.1. Les parois opaques .....	36
1.3.2.2.2. Les vitrages :.....	38
1.3.2.2.3. Le volume d'air :.....	38
1.3.2.2.4. Assemblage du modèle d'un bâtiment :.....	39
1.3.2.3. L'apport de la systémique, le sous-système zone .....	41
1.4. L'état de l'art.....	43
1.5. Notre cahier des charges :.....	46
1.5.1. Multi-modèle :.....	46
1.5.2. Modularité :.....	47
1.5.3. Détaillé :.....	47
1.5.4. Aide à la conception :.....	47
1.6. Conclusion.....	49

## 1.1. Introduction

Une pression qualitative croissante au niveau des réalisations a donné naissance à de nouveaux métiers liés à l'énergétique des bâtiments et à la prise en compte de ces aspects dans le processus de conception. La réglementation actuelle, constituant un plancher de la performance admissible, conduit à des règles de dimensionnement statique et n'intègre pas l'aspect dynamique de la réponse thermique ou énergétique d'un bâtiment. Ceci est problématique, les concepteurs se devant d'apporter des réponses liées par exemple au confort thermique ou encore aux stratégies d'intermittence [Lefebvre 89]. Les considérations précédentes ont amené les acteurs du domaine à dépasser le cadre de cette réglementation pour construire des outils s'intéressant de plus près au fonctionnement du système bâtiment.

Comme dans d'autres disciplines, l'informatique et en amont la **modélisation** correspondante sont devenus des maîtres mots. Ce premier chapitre met l'accent sur les différentes méthodes de modélisation. L'analyse systémique formant le socle conceptuel de notre propos, les concepts et outils de cette démarche se retrouveront en filigrane dans chacun des chapitres suivants. Dans le cas de la thermique de l'habitat, la méthode classique, analytique, si elle apporte des réponses, reste très proche de la physique des phénomènes. En conséquence, les outils issus de cette démarche excluent de fait un utilisateur tel qu'un architecte. L'analyse systémique nous permettra d'une part de concilier la rigueur d'une modélisation détaillée et l'orientation conception de notre travail et d'autre part d'esquisser la description de notre objet d'étude.

## 1.2. La modélisation :

Le concept de système est inséparable du concept de modèle, conçu comme un ensemble de signes représentatif d'un système concret. Le modèle recouvre donc toute représentation d'un système réel, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique.

La notion de *système* s'est intégrée à tant de domaines et avec tant de significations différentes qu'il n'est pas aisé de la définir hors d'un contexte donné. Dans le vocabulaire courant, se retrouvent ainsi le système bancaire, un système informatique ou encore immunitaire. [Rosnay 75] propose comme définition celle d'un *ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but*. Une autre définition, [Walliser 77], est la suivante : *entité relativement individualisable, qui se détache de son milieu ou de son contexte tout en procédant à des échanges avec l'environnement*. Ces deux premières définitions mettent en jeu deux propriétés qui nous paraissent fondamentales: celle de la finalité d'un système pour la première et pour la seconde l'aspect des échanges.

Bien que ce chapitre forme un tout, tentons en préliminaire de donner une définition initiale au premier des mots du titre. [Le Moigne 90] définit la modélisation de la façon suivante : *Action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles*. Au départ de cette définition, les sous chapitres suivants proposent des points d'ancrage et quelques concepts qui nous mèneront à la modélisation thermique des bâtiments.

### 1.2.1. Quelques repères sur les méthodes de modélisation :

L'histoire de la modélisation et plus encore celle des Sciences fait apparaître la domination des méthodes analytiques. *La procédure analytique signifie qu'on peut réduire à l'une des parties l'objet étudié et que, par conséquent, on peut le reconstituer à partir de celles ci* [Bertalanffy 73]. Cette réduction de l'art de penser à la logique analytique s'appuie sur le positivisme ou classification hiérarchique des méthodes et disciplines. Ainsi, par dichotomie de l'objet, la classification précédente met à la disposition du modélisateur une batterie d'outils, performants dans

chacun de leurs domaines d'application, mais pas aisément combinables pour comprendre la globalité de l'ensemble. Cette théorie des systèmes, dite classique, utilise comme principal outil d'investigation les mathématiques classiques, c'est à dire l'analyse. De manière intrinsèque, la validité de cette démarche dépend de deux conditions: la première restriction concerne la faiblesse des interactions entre les parties étudiées séparément. Ainsi, les parties constituantes seront isolées en vue de leur analyse et pourront ensuite être réunies pour reformer l'objet initial. La seconde limitation impose que les lois régissant le fonctionnement des parties soient linéaires. A cette condition, l'équation décrivant le comportement de l'ensemble a la même forme que celles décrivant les parties et s'obtient à l'aide du théorème de superposition.

Le modèle positiviste proposé par Auguste Comte établit une carte du territoire du système des sciences. Le tableau synoptique du cours de philosophie positive classe hiérarchiquement les disciplines et la méthode analytique est alors la Méthode de référence.

Remettant en cause le cloisonnement et le caractère statique de la classification précédente, Piaget propose une organisation cyclique des sciences, connue sous le nom d'organisation constructiviste. Les quatre pôles en sont les sciences de la matière, de la vie, du mouvement et de l'ingénierie. Au départ des pôles précédents, cette démarche attribue à la genèse des paradigmes une structure cyclique, explicitée sur la figure 2, le paradigme désignant un nouveau schéma conceptuel.

#### 1.2.1.1. Le paradigme Systémique :

L'évolution des courants de pensée s'est traduite par l'apparition de nouveaux paradigmes. La Théorie des Systèmes propose la genèse suivante du paradigme systémique :

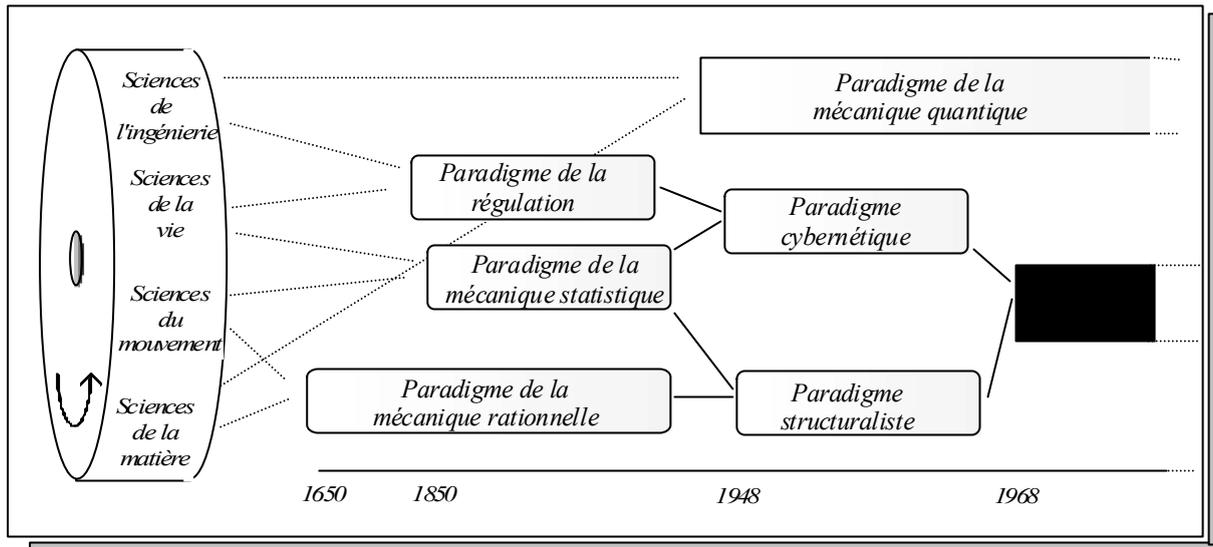


Fig. 2 : La genèse du paradigme systémique

### 1.2.1.2. Le Système Général :

Reprenant la définition donnée dans [Robin 91a], le *Système Général* est un artefact purement arbitraire et créé de toutes pièces pour servir d'outil de conceptualisation. Il offre un cadre et une méthode à toute perception, toute modélisation d'un objet réel, d'un phénomène ou d'un processus. Pour tenter de différencier ces paradigmes, arrêtons-nous un instant sur la définition du *Système Général* donnée par Le Moigne : *la représentation d'un phénomène actif perçu identifiable par ses projets dans un environnement actif, dans lequel il se transforme téléologiquement (en vue d'objectifs)*.

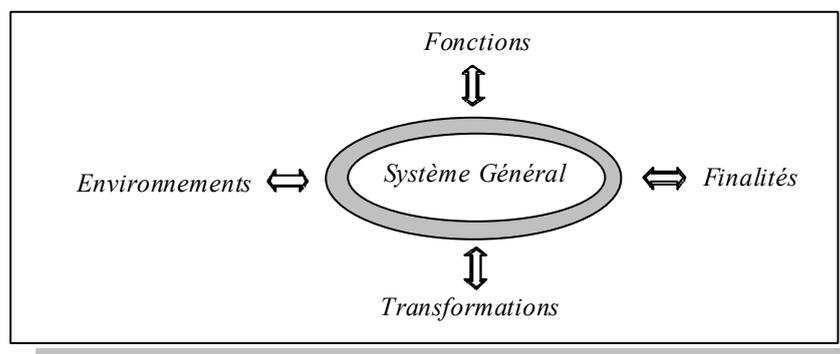


Fig. 3 : Le Système Général

Les pôles identifiés par la définition précédente et la figure 3, environnement, évolution, fonction et finalité sont reliés entre eux pour matérialiser différentes interactions. En y ajoutant la forme (structure ou *Gestalt*), le schéma suivant permet de cibler les différents paradigmes :

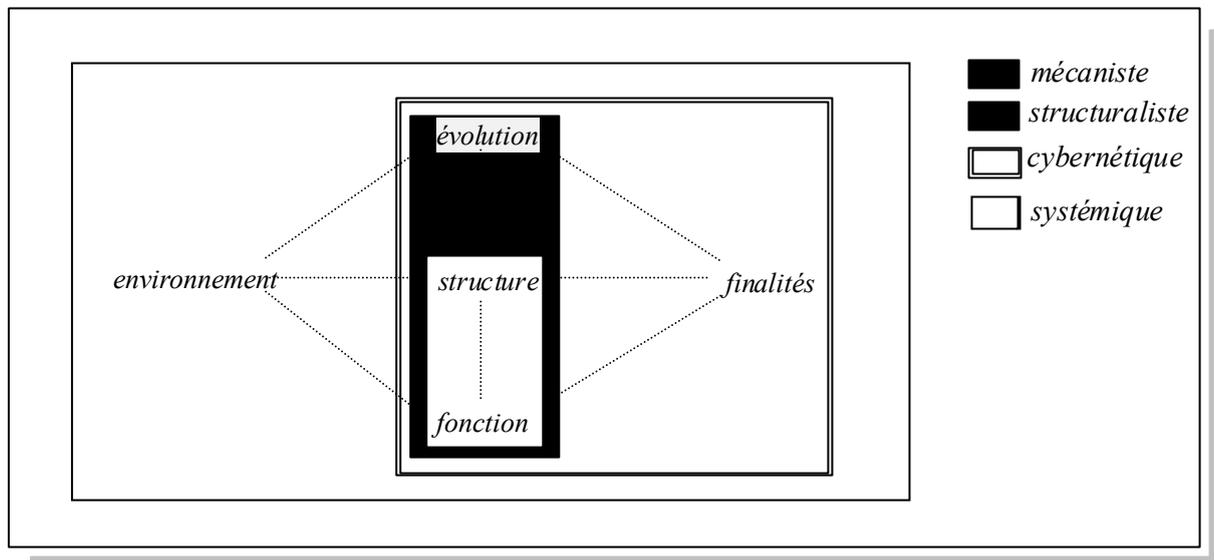


Fig. 4 : le Système Général et les paradigmes

Pour en arriver au paradigme systémique actuel, définissons en quelques mots les paradigmes qui l'ont immédiatement précédé. Le paradigme structuraliste implique que le comportement d'un système est régi par l'assertion suivante: le modèle classique de la forme (*structure*), qui en fonctionnant se transforme (*évolution*), et en se transformant assure quelques fonctions (*fonction*).

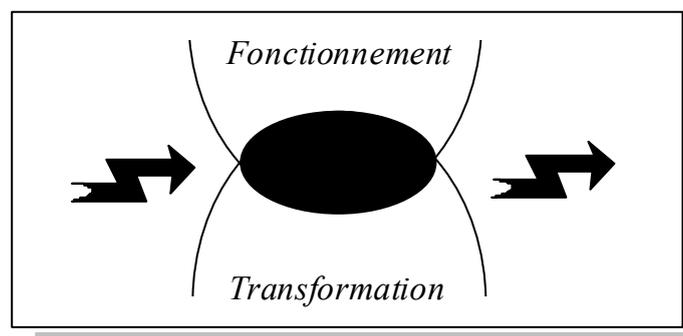


Fig. 5 : Boîte noire structuraliste ou conjonction de deux pôles

La logique conjonctive illustrée par la figure 5, est caractéristique du système général et s'oppose à la logique disjonctive (ou Aristotélicienne). En associant le résultat (ou finalité) du système, est alors

caractérisé le paradigme cybernétique. En Automatique classique, un exemple de finalité est la consigne d'un asservissement de position. Avec la prise en compte de l'environnement (au sens large) de l'objet, le *Système Général* est alors reconstitué.

## 1.2.2. La modélisation systémique :

### 1.2.2.1. L'outil ou systémographe :

La mise en oeuvre du Système Général, ou utilisation du Systémographe, se fait selon deux lois de construction représentées sur la figure 6 :

- Isomorphie du modèle au Système Général. Le modèle, tout comme le Système Général, est un objet qui, doté de finalités, fonctionne, se structure et évolue dans un environnement.

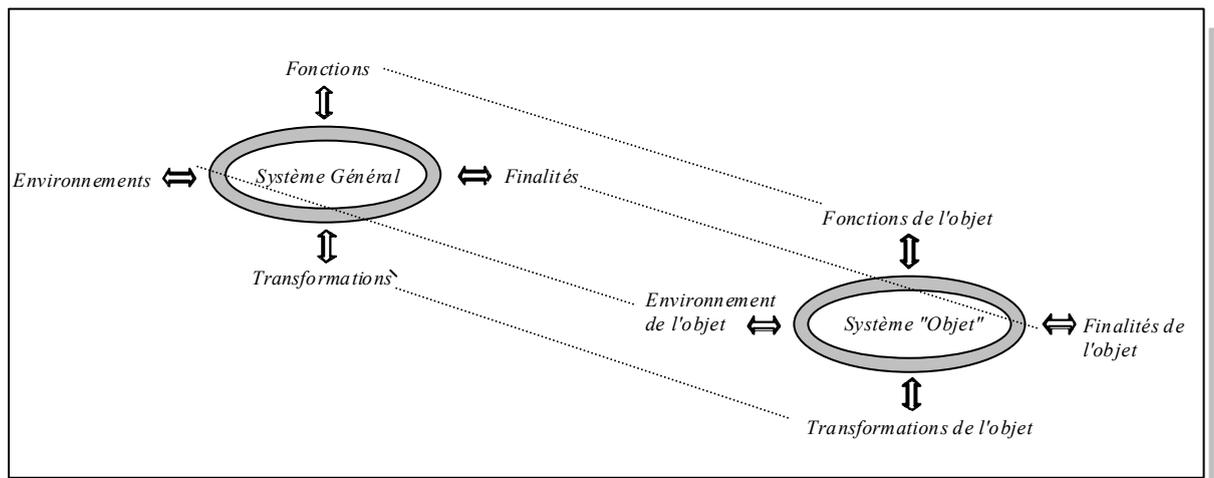


Fig. 6 : L'isomorphie au Système Général

- Homomorphie du modèle à l'objet représenté : on doit pouvoir faire correspondre à chacun des traits dont on pare le modèle un trait perçu ou anticipé à l'objet considéré. Cette homomorphie, moins contraignante que l'isomorphie précédente, exprime le caractère discrétionnaire du modélisateur [Robin 91a] et implique la possibilité d'obtenir avec cette démarche plusieurs modèles d'un même objet. Pour un système donné, il existe donc une infinité de modèles, plus ou moins complets. Pour chacun de ces modèles, la zone de recouvrement entre le modèle et le système est plus ou moins importante, selon le degré de sophistication du modèle. Dans l'exemple de la figure 7,

pour trois modèles  $M1$ ,  $M2$  et  $M3$  du système  $S$ , nous dirons que  $M2$  est un modèle simplifié par rapport à  $M3$ .

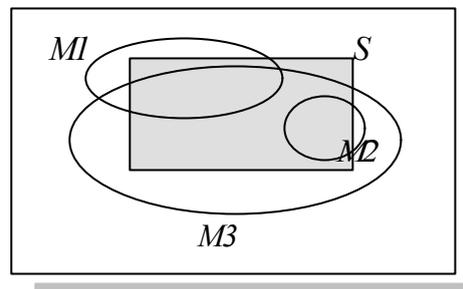


Fig. 7 : Différents modèles d'un système

#### 1.2.2.2. La démarche :

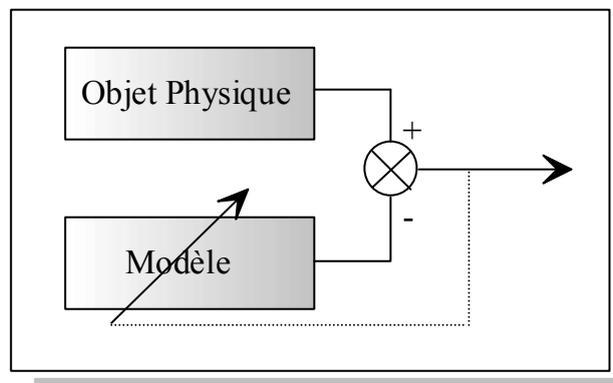
Le paragraphe précédent impose les propriétés que doit vérifier le modèle. La manière de construire ce modèle n'est pas évoquée explicitement. Le passage d'un système à un modèle fait intervenir un code de modélisation. Nous donnons deux pistes, qui à l'analyse, se révèlent être la même, l'une en donnant une description plus simplifiée : *L'analyse de systèmes consiste à définir les limites du système à modéliser; à identifier les éléments importants et les types d'interactions entre ces éléments, puis à déterminer les liaisons qui les intègrent en un tout organisé. Éléments et types de liaison sont classés et hiérarchisés. Puis on dégage et on identifie les variables de flux, les variables d'état, les boucles de rétroaction positives et négatives, les délais, les sources et les puits. Chaque boucle est considérée séparément et son influence sur le comportement des différents sous-ensembles est évaluée* [Rosnay 75]. En fin de course, la modélisation consiste à construire un modèle à partir des données de l'analyse des systèmes. La démarche détaillée, reprenant les étapes précédentes, est explicitée par Le Moigne.

Dans des disciplines aussi variées que les sciences sociales, la biologie ou l'énergétique, apparaît la nécessité d'une nouvelle démarche visant à l'étude des systèmes présentant une complexité organisée. L'analyse systémique se veut alors une approche commune transdisciplinaire, permettant de mieux comprendre et décrire la complexité organisée.

#### **1.2.3. Les buts poursuivis :**

Rosnay définit l'analyse systémique comme une *nouvelle méthodologie permettant de rassembler et d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action*. Selon la précédente définition et celle proposée par Le Moigne, la modélisation qui découle de l'analyse précédente est particulièrement efficace, au-delà de la compréhension, en vue de modifier ou de commander le système concret.

Un modèle étant arrêté, la simulation étudie le comportement dans le temps d'un système complexe. Selon [Walliser 77], la simulation peut être classée en plusieurs catégories : simulation opérationnelle, simulation analogique et simulation digitale. Nous nous intéresserons principalement à cette dernière. La simulation permet l'accès à de l'information supplémentaire (ou projective) sur l'objet physique, telle que l'évolution de telle variable pour telle séquence d'entrée donnée, en terme de futur probable. Cependant, les résultats de la simulation ne doivent pas être confondus avec la réalité. Conformément à la figure 8, c'est à la suite de comparaisons avec la réalité, en utilisant une procédure itérative, que le modèle de départ peut être modifié. L'étape précédente porte le nom d'identification et a pour objet l'ajustement de certains paramètres du modèle physique du système [Gswind 89].



*Fig. 8 : Ajustement de modèle*

Pour introduire le chapitre précédent s'intéressant à la thermique du bâtiment, Brau indique que pour pouvoir rendre compte de l'évolution réelle de la température sèche d'une zone, il est nécessaire de multiplier par un coefficient deux à trois la capacité thermique associée à l'air d'une zone, lors du processus classique de modélisation [Brau 80].

### **1.3. L'application à la thermique des bâtiments :**

La décomposition induite par la démarche systémique peut se faire selon un premier axe qui est celui de la nature des phénomènes. Le système bâtiment est alors perçu comme un ensemble de sous-systèmes interagissant plus ou moins entre eux et avec l'environnement.

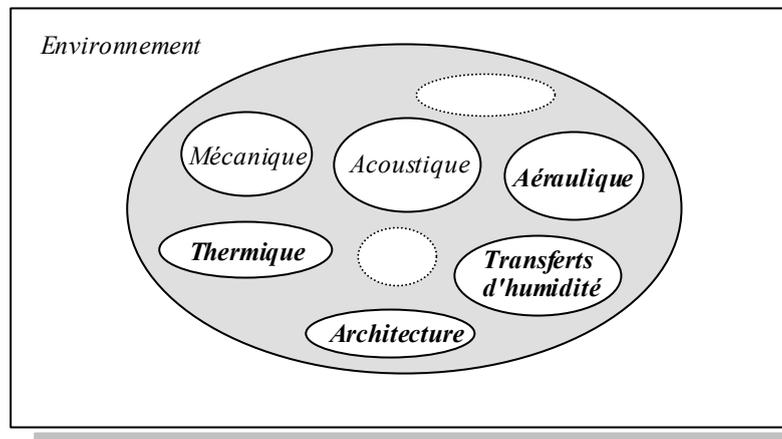


Fig. 9 : Le domaine Bâtiment

Certains de sous-systèmes étant alors privilégiés dans le cadre de notre étude, nous réduirons le bâtiment à sa dimension hygro-thermique, en ne conservant des sous systèmes précédents que ceux mis en gras : Thermique, Architecture, Transferts d'humidité et Aéraulique. Entre ces sous-systèmes phénoménologiques, des relations existent, se matérialisant par des flux de matière ou d'énergie. L'environnement du bâtiment, c'est à dire l'extérieur échange aussi avec les sous-systèmes précédents et constitue un sous-système particulier. Entre ce premier groupe de sous-systèmes et l'architecture, les interactions sont de nature informationnelle.

### 1.3.1. Une typologie des besoins en logiciels thermiques

Au départ d'un tableau croisé entre les acteurs et les phases de la vie d'un bâtiment [BRETON 88], l'auteur décrit neuf situations de demandes logicielles, finalement regroupées en quatre parties identifiées par les lettres de A à D.

	Avant-projet	Projet	Gestion courante	Audit et amélioration
Architecte	A			
Ingénierie	A	B		D
Bureau de contrôle		B		
Installateur		B		

Exploitant			C	
Gestionnaire			C	D

Le découpage des opérations appelle quelques explications : l'avant projet évoqué comprend l'esquisse, la faisabilité, l'avant projet sommaire (APS) et l'avant projet détaillé (APD). Le projet comprend les phases suivantes, du projet proprement dit à la réception des travaux. La gestion courante d'un bâtiment rassemble les tâches d'exploitation, d'entretien et par exemple de suivi des consommations énergétiques. D'une façon plus ponctuelle, un audit peut être conduit, permettant d'envisager des améliorations en termes de confort ou de comportement énergétique.

Les six acteurs retenus pour cette étude, s'ils sont explicites, ne tiennent cependant pas compte de trois types de demandeurs : producteurs d'énergie (EDF/GDF), formateurs et chercheurs. Nous reviendrons plus tard sur ces aspects.

L'analyse de ces neuf demandes permet d'identifier des besoins élémentaires que nous allons rapidement passer en revue.

- Pour le groupe A, s'adressant à la fois au thermicien et à l'architecte, l'une des contraintes est de respecter la culture de l'architecte et d'accepter des données descriptives d'avant projet, lesquelles peuvent être peu ou mal définies. A l'usage de l'architecte, ce type de produit lui permet de s'assurer de la cohérence des choix architecturaux et de certains aspects, dont l'aspect thermique. Idéalement, une approche multi-critères serait intéressante, concernant aussi bien le confort thermique que visuel ou encore acoustique. Les fonctions à remplir sont celle de l'estimation des coefficients réglementaires, de l'éclairage des façades vitrées principales ou encore des conditions thermiques extrêmes. Le thermicien, à ce stade, s'intéresse à une approche technico-économique du bâtiment et quant au choix des systèmes de traitement d'air à une estimation de leurs consommations. La performance thermique ou énergétique peut alors être évaluée à l'aide de ratios ou de critères.

- Le groupe B voit l'intervention d'un troisième acteur, l'installateur. Ce dernier est responsable du choix des équipements (chauffage, ventilation, eau chaude sanitaire, ...) et la demande en logiciel est alors centrée sur le dimensionnement. Le concepteur thermicien arrête à ce moment des choix techniques (enveloppe, équipement) et s'assure de la conformité réglementaire, principale mission assurée par les bureaux de contrôle. Pour ces derniers, les besoins correspondent à l'informatisation des méthodes de calcul réglementaires.

- Le groupe suivant, C, est celui des outils aidant à l'exploitation climatique d'un bâtiment et de ces équipements. Pour mémoire, dans les immeubles non réhabilités antérieurs à 1975, le poste énergie représente 50 à 80 % des charges globales locatives [Brejon 88]. La principale préoccupation de l'acteur gestionnaire est alors l'évolution du coût d'exploitation du bâtiment. Au travers du suivi énergétique d'un bâtiment, l'objectif thermique est d'optimiser ce coût et de décider des investissements à réaliser.
- La thermique d'audit, à l'usage du thermicien et du gestionnaire constitue le groupe D. L'importance du parc de logements construit avant la crise de l'énergie a donné naissance à l'audit énergétique des bâtiments, destiné à chiffrer les scénarios possibles de travaux d'amélioration portant sur l'enveloppe, les équipements ou le mode de gestion.

Les producteurs d'énergie s'intéressent de plus en plus à l'aval de la production, c'est à dire à son utilisation industrielle et domestique. Par rapport à cette dernière catégorie, cet intérêt se manifeste par leur implication dans des programmes de recherche communs ou encore par le développement de codes de calcul internes, tels que *CLIM 2000* pour EDF [Bonneau 93], [Rongere 89] ou *ALLAN* pour GDF [Jeandel 93]. Notons que les particularités du climat et de chaque centre de production peuvent amener des problèmes particuliers. A la Réunion, le problème d'EDF est d'écrêter les maximums de la courbe de charge, qui nécessitent la mise en route de turbo alternateurs alimentés en diesel [Chabriat 92]. Suite à cette situation, le coût de revient de l'énergie électrique est à la Réunion supérieur au prix de vente au consommateur. La stratégie d'EDF consiste alors à promouvoir l'habitat passif ou économe en énergie et à tester certaines solutions pour décaler la demande d'électricité en dehors des heures de pointe.

Les formateurs jouent un rôle particulier, en ce qu'ils se trouvent à un moment donné entre les logiciels existants sur le marché et les utilisateurs potentiels actuels (formation continue) ou futurs (formation initiale). En tant que demandeurs, leur rôle est de mettre en évidence les modifications des pratiques professionnelles engendrées par la diffusion des logiciels. Certains secteurs ont fait l'objet de logiciels spécifiques, à fort contenu pédagogique. Des exemples de réalisation en sont les logiciels

*CASAMO-CLIM* et *CODYBA*, prévus au départ comme outils de l'architecte thermicien, et qui ont connu un succès significatif dans ce domaine de la sensibilisation des architectes aux aspects thermiques et énergétiques.

Les chercheurs en énergétique des bâtiments constituent un groupe sensiblement à part. Bien souvent à l'origine de l'offre détaillée précédemment, ils sont par ailleurs demandeurs de deux types de produits. Le premier est celui des outils de simulation de systèmes, non dédiés spécifiquement à la physique du bâtiment, permettant à chacun de s'intéresser à un domaine particulier (thermique, systèmes énergétiques couplés au bâtiment, ...), tout en faisant partie d'un réseau d'utilisateurs pouvant échanger des modules ou encore des astuces. L'exemple typique en est le logiciel *TRNSYS* [TRNSYS 79]. L'autre type de produit est celui des logiciels à orientation recherche, tels *ESP* [Clarke 85], cette fois dédiés au bâtiment, mais permettant une analyse fine des phénomènes physiques mis en jeu.

### 1.3.2. La modélisation thermique des bâtiments :

Mettant successivement à profit la théorie du *Système Général* dans le cas d'un bâtiment, de l'activité conception, puis conception thermique d'un bâtiment, Robin [Robin 91a] propose un modèle de cette dernière activité se schématisant de la façon suivante :

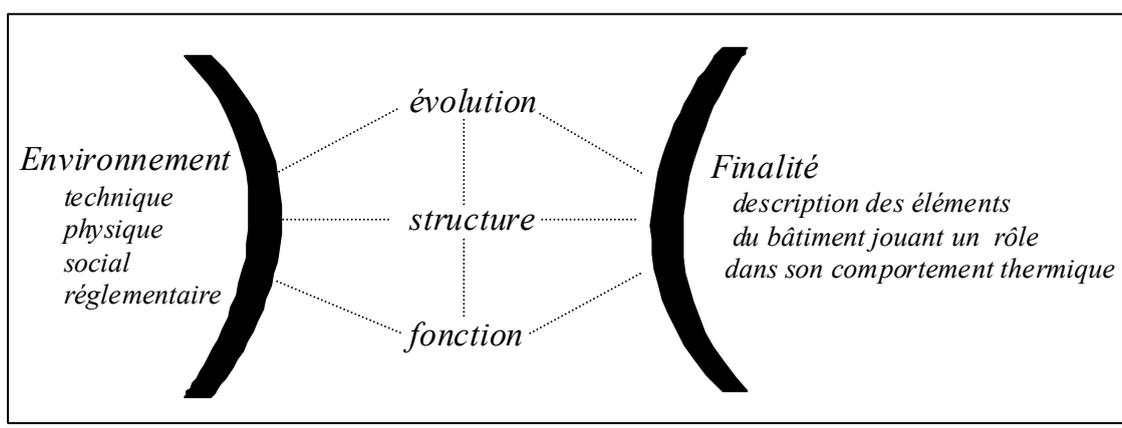


Fig. 10 : Modèle activité conception thermique

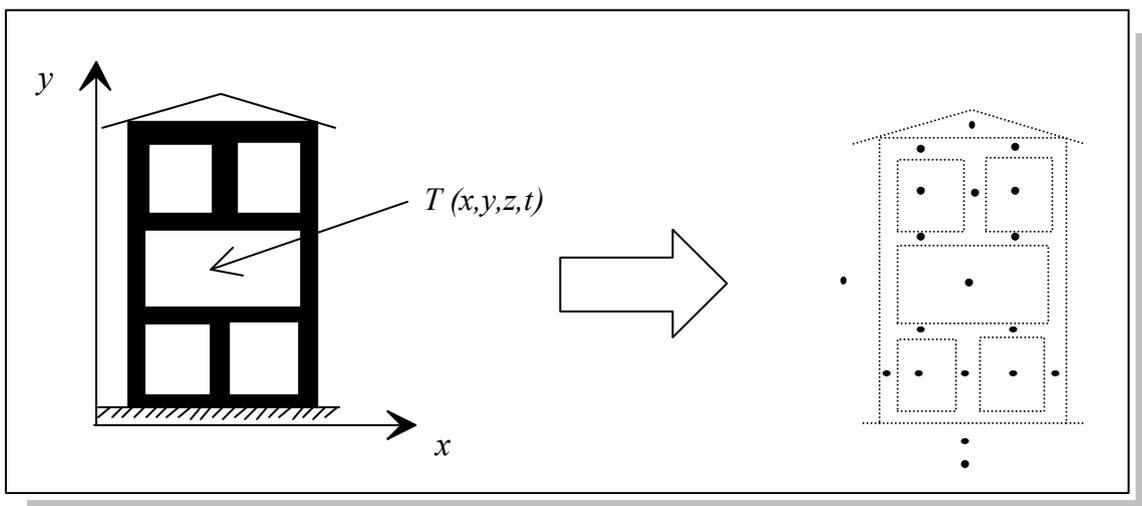
Les interactions entre les différents pôles sont symbolisées par les pointillés. L'environnement physique, caractérisé entre autres par le climat, possède en particulier une interaction forte sur la

structure du bâtiment. Certaines contraintes réglementaires sont aussi à prendre en compte. En phase de conception, la détermination de certaines caractéristiques (épaisseur d'isolant, taille des ouvertures et des masques, ....) constitue la finalité à atteindre.

### 1.3.2.1. Le choix d'une catégorie de modèles :

Les objectifs que nous envisageons sont ceux d'un outil utilisable par les praticiens du génie climatique et thermique dans l'habitat. La finalité conditionne ainsi le modèle, que nous qualifierons alors de simplifié, en raison de certaines hypothèses simplificatrices.

En ne considérant que l'aspect thermique, l'état thermique d'un bâtiment est conditionné par la détermination du champ des températures de l'espace continu délimité par les limites physiques de la construction. De par sa définition, un modèle se propose de rendre compte de la réalité d'une manière qui ne peut être qu'imparfaite. Le modèle absolu ou universel, c'est à dire permettant la détermination précédente, est utopique. La démarche communément adoptée en physique est celle de la discrétisation, illustrée dans le cas d'un bâtiment par la figure 11:



*Fig. 11 : La discrétisation thermique d'un bâtiment*

Ainsi, au départ d'une approche réelle et microscopique de la thermique du bâtiment, la discrétisation et le modèle d'état qui en résulte constituent une approche macroscopique [Axley 89]. Au passage, la constitution de ce modèle réduit sous-tend l'adoption de certaines simplifications, illustrées par exemple par les hypothèses d'uni-directionnalité des transferts conductifs ou par l'isothermie des volumes d'air de chaque zone. De la même manière, des modèles réduits seront construits pour l'aérodynamique et les transferts d'humidité.

#### 1.3.2.2. Application de la méthode analytique :

*Un système est une totalité dynamique d'éléments dont l'interaction produit des propriétés d'intégration nouvelles, non réductibles à celles de ces composants pris indépendamment.*

La méthode analytique ramène le système bâtiment à ses éléments les plus simples pour les étudier un à un et comprendre les types d'interaction qui existent entre eux. Cette démarche décompose le système bâtiment en sous-systèmes qui interagissent entre eux et avec l'environnement. Ces sous-systèmes sont les parois, les fenêtres, les volumes d'air, la climatisation, ... . Pour chacun de ces objets, le champ thermique traduit un état d'équilibre instantané entre les trois modes de transfert : conduction, convection et rayonnement. Pour chacun de ces phénomènes, des modèles analytiques sont disponibles. A chacun des sous systèmes correspond donc des modèles traduisant chacun un phénomène de transfert de chaleur. Pour chacun des modèles, certaines hypothèses ou simplifications sont adoptées : certaines seront évoquées ici pour souligner l'inter dépendance modèle et domaine de validité, mais elles seront détaillées dans les deux chapitres suivants, liés aux modèles physiques.

Nous allons dans un premier temps appliquer la méthode analytique, laquelle est centrée sur les objets, à la différence de la méthode systémique basée sur l'Action. Bertalanffy oppose la question "*Qu'est ce que ça fait ?*" de la modélisation systémique à la trame de la modélisation analytique, résumée par "*De quoi c'est fait ?*". Nous allons ainsi détailler sensiblement le modèle d'une paroi opaque, d'un vitrage et d'un volume d'air intérieur pour constituer un modèle d'un bâtiment simpliste.

##### **1.3.2.2.1. Les parois opaques**

Pour le modèle conductif, les variables d'entrée sont pour chacune des deux faces - indicées par 1 et 2 - un flux convectif  $\phi_{CV}$ , un flux radiatif de courte et un autre de grande longueur d'onde, respectivement  $\phi_{SW}$  et  $\phi_{LW}$ . Les variables de sorties sont les températures des différents noeuds de discrétisation de la paroi,  $\{Ti\}$ , et en particulier les deux températures de surface  $Ts1$  et  $Ts2$ . Pour ne pas surcharger le schéma du modèle, nous omettons les entrées liées à la description.

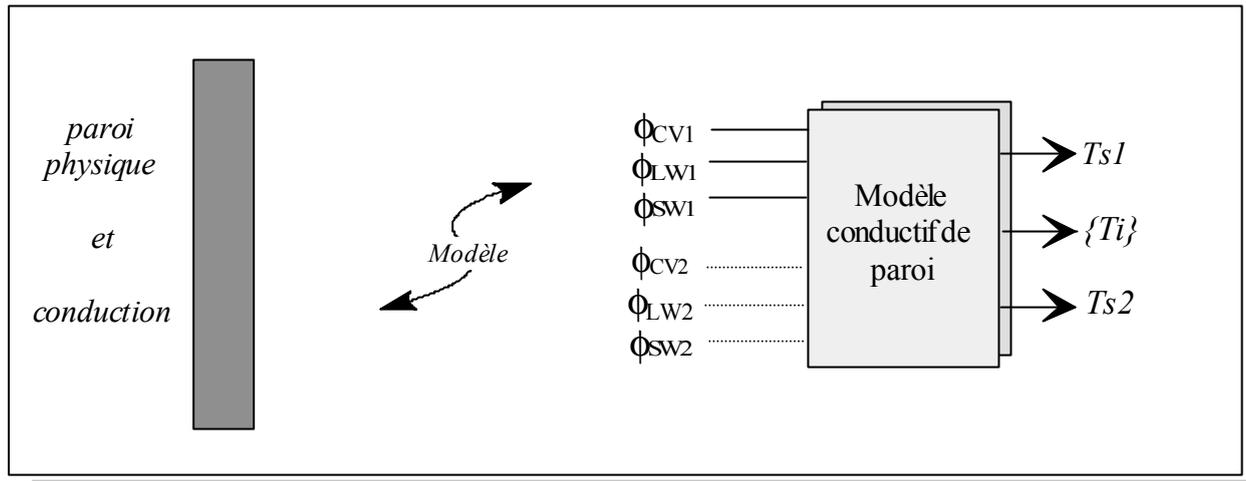


Fig. 12 : Schéma bloc de la conduction, cas d'une paroi opaque

Les principales hypothèses réductrices sont les suivantes :

- Conduction mono-dimensionnelle
- Répartition du spectre entre grandes et courtes longueurs d'ondes
- Propriétés radiatives des faces constantes dans chacun des domaines précédents
- Modèle macroscopique de la convection

Vis à vis de ce dernier phénomène, en choisissant des modèles où n'interviennent que les températures de surface et des fluides environnants, un modèle peut être représenté par le schéma de la figure 13 ,  $Ta$  désignant la température de l'air baignant l'une des faces :

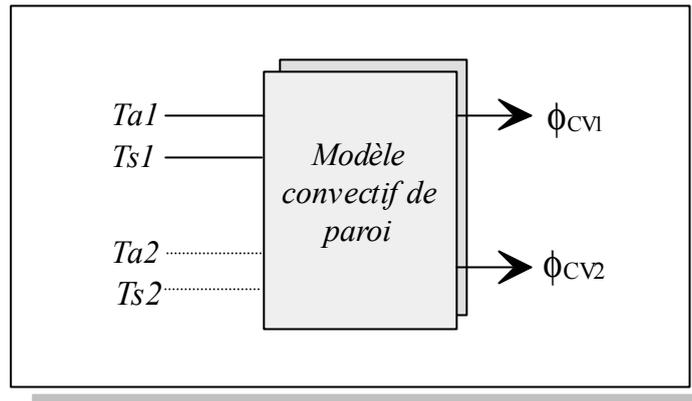


Fig. 13 : Schéma bloc de la convection, cas d'une paroi opaque

Pour les effets radiatifs de grande longueur d'onde, le modèle radiatif admet en entrée la température du ciel  $T_c$  parmi les variables météorologiques (un autre choix aurait pu être la température radiante extérieure) et les températures de surfaces intérieures des parois formant enceinte.

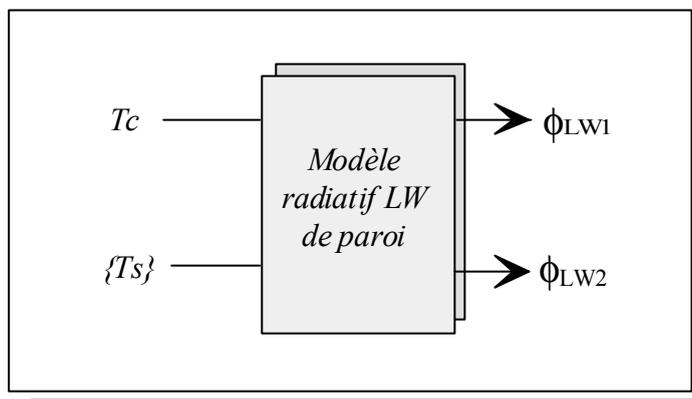


Fig. 14 : Schéma bloc des échanges radiatifs de grande longueur d'onde

Comme précédemment, des hypothèses de modélisation sont assumées implicitement:

- Prise en compte des effets radiatifs extérieurs de grande longueur d'onde au travers de la température du ciel
- Transparence de l'air vis à vis des effets radiatifs

A la suite de la décomposition précédente, l'assemblage correspond à la recombinaison des modèles traitant un aspect particulier pour obtenir un modèle thermique du composant. Pour un seul élément du type paroi opaque, le modèle thermique de cet élément s'obtient en disposant sur un même

schéma les trois modules correspondant aux trois modes de transfert. Les variables communes sont reliées entre elles, pour donner le schéma suivant :

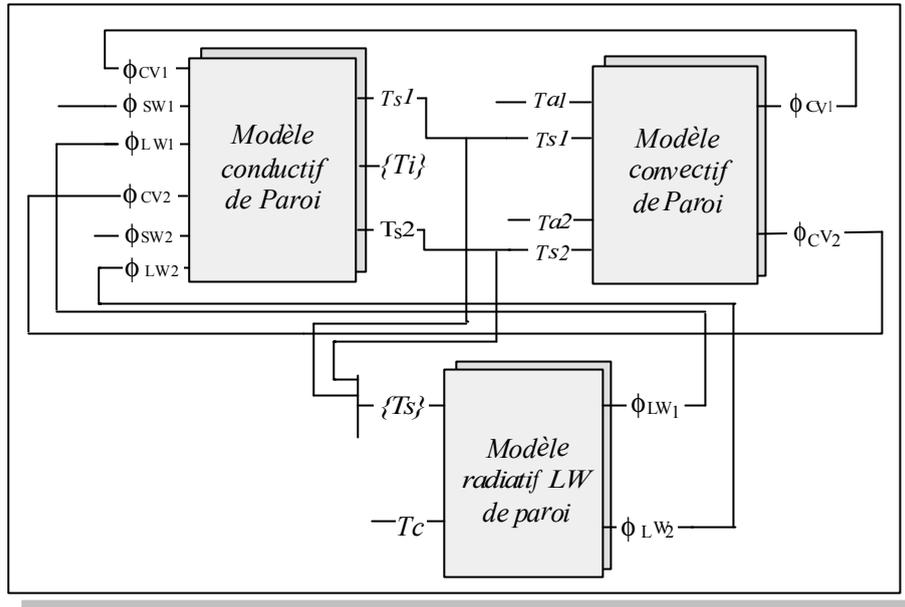


Fig. 15 : Assemblage du modèle thermique d'une paroi opaque

### 1.3.2.2.2. Les vitrages :

Les modèles conductifs, convectifs et radiatifs précédents peuvent se généraliser au cas des vitrages. Il est cependant nécessaire de définir le modèle courtes longueurs d'onde du vitrage. En l'absence de masque, les entrées disponibles sont les rayonnements horizontaux direct  $Dh$  et diffus  $dh$  et les sorties les flux direct et diffus transmis à travers le vitrage :

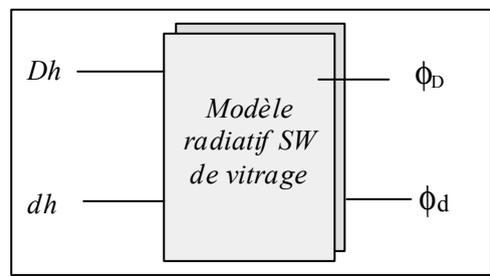


Fig. 16 : Schéma bloc radiatif de courte longueur d'onde d'un vitrage

Les vitrages sont supposés être caractérisés par leurs caractéristiques optiques et sont dans notre cas en particulier opaques au rayonnement de grandes longueurs d'onde.

### 1.3.2.2.3. Le volume d'air :

Avec les hypothèses d'isothermie du volume d'air et de transparence du milieu au rayonnement de grande longueur d'onde, les flux convectifs échangés avec les parois et vitrages intérieurs au local permettent de retrouver la température sèche d'équilibre de l'air. En l'absence de charges internes convectives, le modèle associé est le suivant :

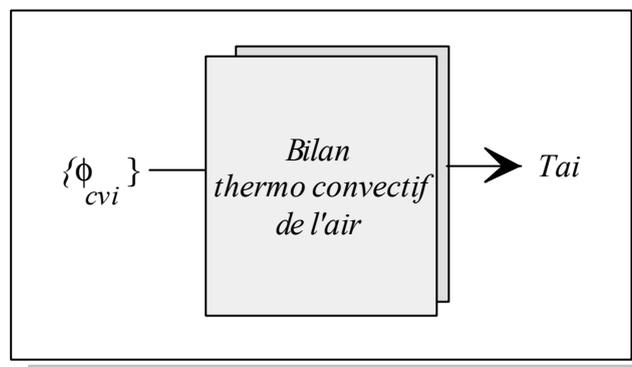


Fig 17 : Modèle thermique du volume d'air

### 1.3.2.2.4. Assemblage du modèle d'un bâtiment :

Soit le bâtiment simplifié de la figure 18, pour lequel les parois autres que celles représentées (A, B et C) ne sont pas prises en compte.

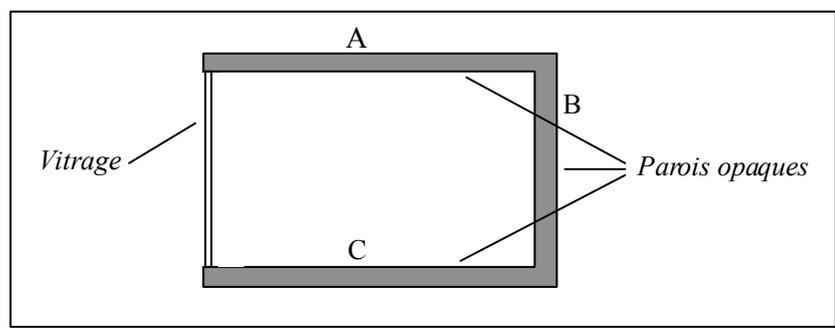


Fig. 18 : Vue en coupe d'un bâtiment simplifié

Pour simplifier notre problème, nous supposons que la paroi plancher C est sur vide sanitaire, la température sèche de ce dernier égalant celle de l'air extérieur. Par ailleurs, vis à vis de nos notations, nous attribuons l'indice 1 à la face interne du bâtiment et l'indice 2 à celle externe.

Par ailleurs, au vu des choix effectués pour les modèles, certains pré-traitements des sollicitations météorologiques sont à effectuer, et sont symbolisés sur la figure 19 par des boîtes blanches. Il s'agit ainsi des modèles de calcul des flux radiatifs extérieurs de courte et grande longueur d'onde et de répartition du rayonnement de courtes longueurs d'onde incident dans la pièce.

Finalement, le modèle thermique du bâtiment représenté sur la figure 19 est obtenu en chaînant les différents modèles élémentaires :

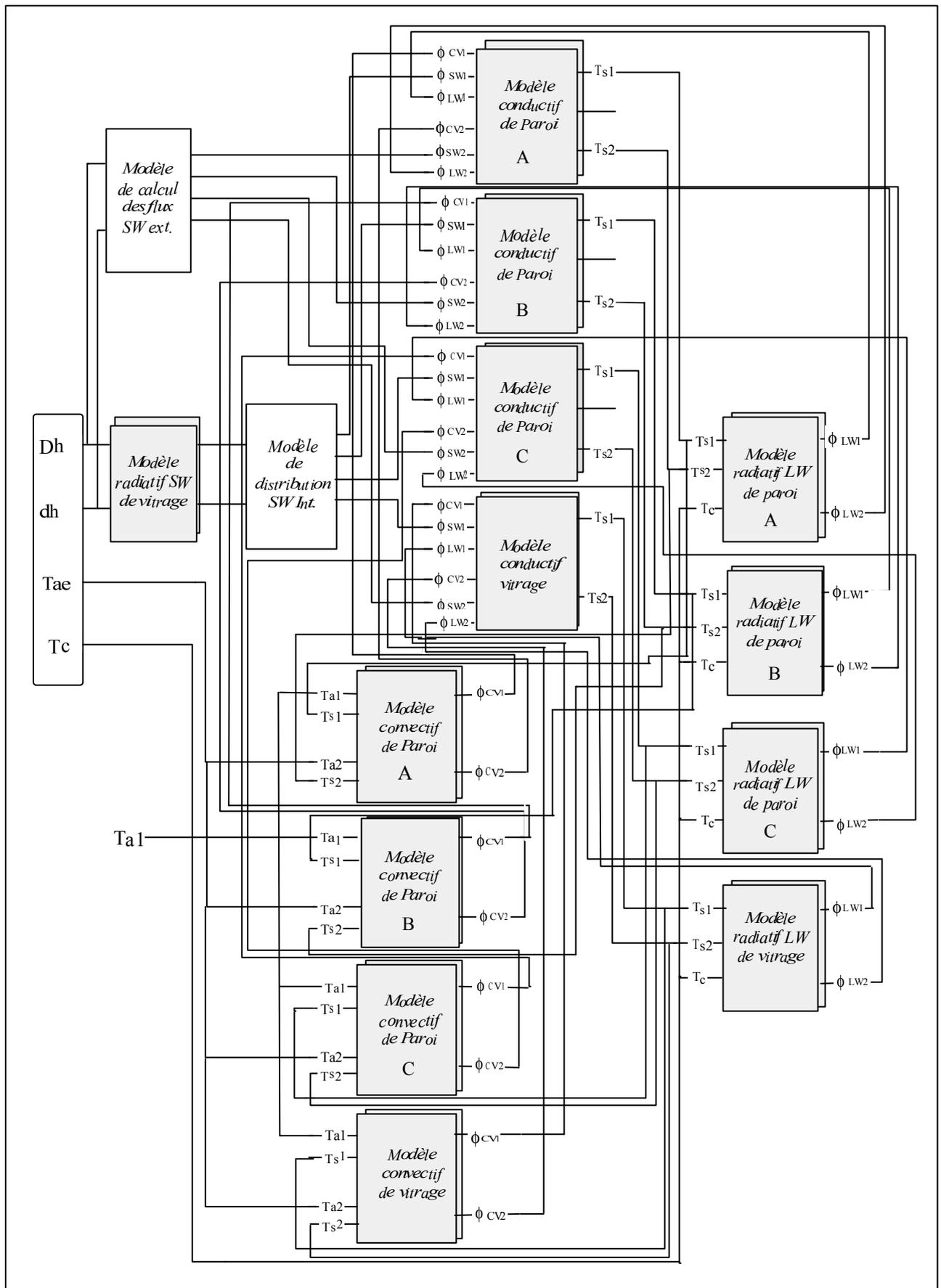


Fig. 19 : Assemblage du modèle thermique partiel d'un bâtiment simple

Sur la figure précédente, une variable est indéterminée,  $T_{a1}$ , c'est à dire la température sèche de l'air du local. En effet, pour fermer notre problème et obtenir le modèle thermique complet du bâtiment, il aurait fallu intégrer le modèle lié au volume d'air. Ceci n'a pas été fait dans un souci de clarté (toute relative) de la figure 19.

La méthode analytique fournit donc la réponse au problème posé de la modélisation thermique du bâtiment. La description naturelle induite par cette méthode nécessite cependant l'information de chacune des connexions entre les différents composants. Certaines difficultés sont ainsi à prévoir pour le cas de bâtiments présentant plusieurs pièces. Sur le cas monozone très simple de la page précédente, ne comportant de plus qu'un petit nombre de composants, le chaînage des modules est déjà une tâche de longue haleine. Notons par ailleurs que cette décomposition quelque peu anatomique n'apporte au concepteur que peu d'informations sur la façon de décrire le bâtiment.

#### 1.3.2.3. L'apport de la systémique, le sous-système zone

Selon Robin, *un bâtiment est une enveloppe, endroit clos et couvert, qui protège des actions extérieures de toute nature un espace interne, siège d'une activité donnée*. Compte tenu du partitionnement de l'habitat en pièces (ce pour des considérations de structure mécanique, sociales ou encore économiques), vis à vis de l'aspect thermique, l'homme va tenter de domestiquer le climat intérieur de tout ou partie de cette habitation. La finalité de la conception thermique fait donc apparaître un partitionnement du volume habitable. La décomposition originelle du bâtiment en l'ensemble des entités le constituant peut alors être enrichie par un sous-système particulier : la zone thermique. Du point de vue fonctionnel, une zone thermique désigne un regroupement de locaux, caractérisés par un comportement thermique homogène : unicité de la programmation des conditions de traitement d'air, homogénéité des caractéristiques thermo-physiques, des flux solaires, ... .

Topologiquement, la zone thermique est constituée d'éléments que nous appellerons composants, tels que les volumes d'air et toutes les entités en contact avec ces volumes : parois, mobilier, charges internes, ... . Compte tenu de ce nouveau concept, la figure 20 expose la hiérarchie obtenue pour les sous-systèmes :

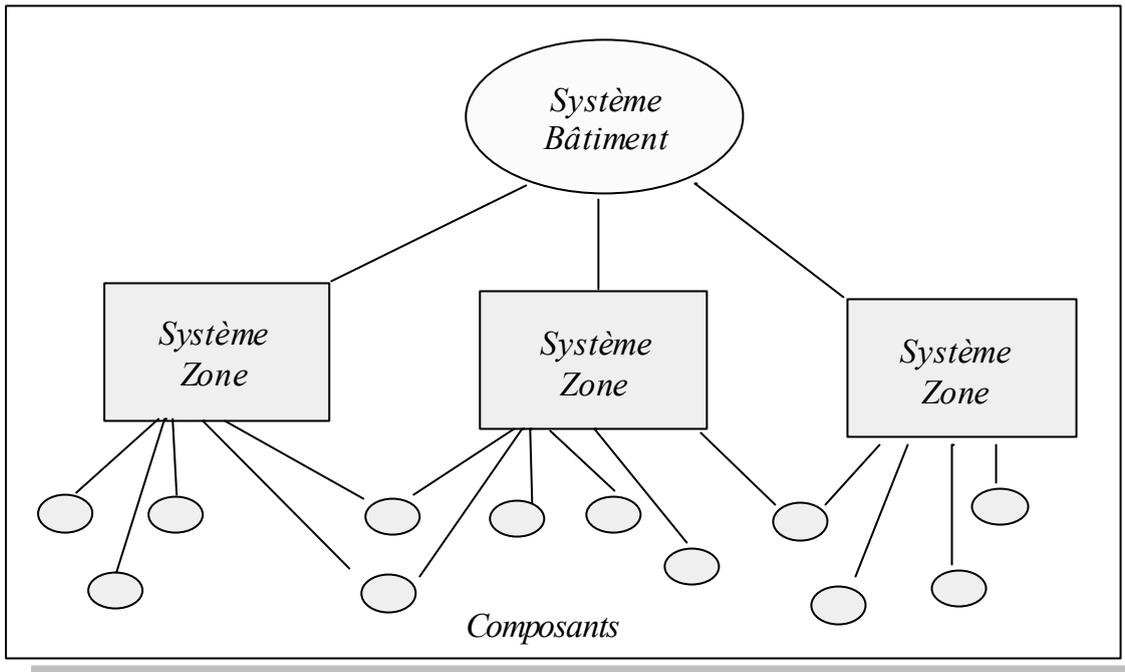


Fig. 20 : Hiérarchie des sous-systèmes

Les relations entre les trois niveaux de la hiérarchie sont **informationnelles** et traduisent des relations d'appartenance. Ainsi, un ensemble de locaux formant une zone thermique appartient à un bâtiment. Hant donné la description choisie pour une zone, notons que les zones sont des espaces non disjoints et qu'un composant peut appartenir à deux zones.

La méthode systémique imposant en particulier de répertorier les interactions entre les systèmes en terme de flux, nous avons représenté dans la figure suivante (21) les différentes interactions possibles entre bâtiment, environnement, zone et composant :

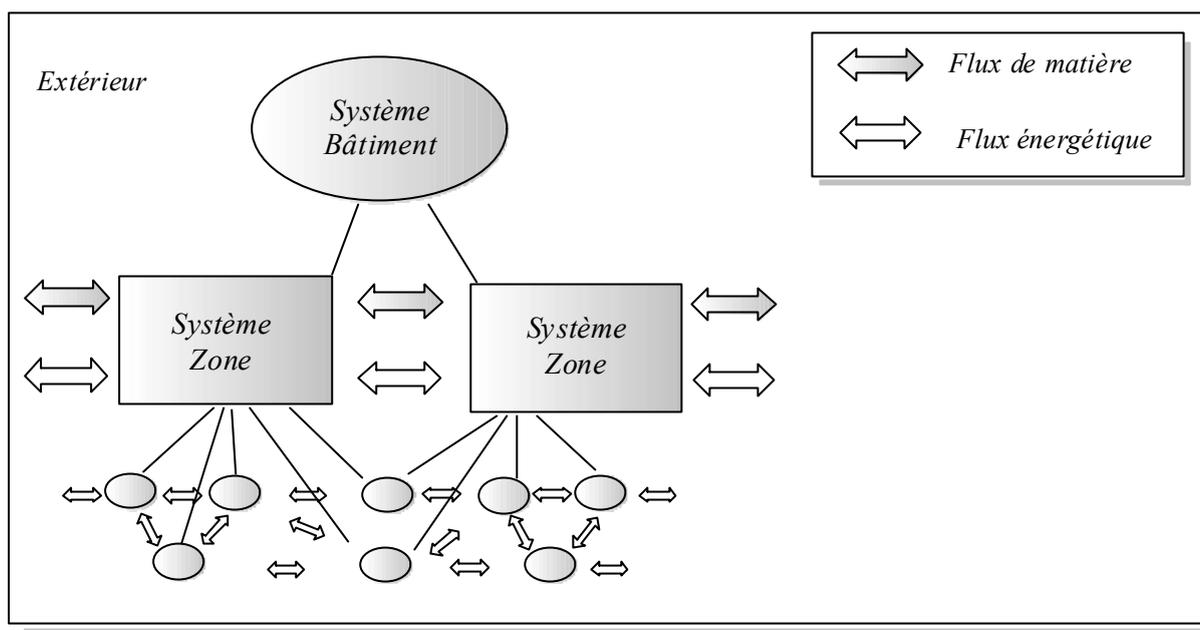


Fig. 21 : Diagramme des flux

Les flux de matière sont en fait des flux d'air, imposés par la ventilation naturelle ou un système mécanique. Les flux que nous avons qualifiés d'énergétiques sont ceux dus aux phénomènes convectifs, conductifs et radiatifs. Il apparaît tout d'abord sur le schéma suivant que les zones échangent entre elles et avec l'extérieur lors des transferts aérauliques. Les composants d'une même zone interagissent au travers de flux énergétiques. Les composants appartenant simultanément à deux zones, que nous nommerons composants *d'inter ambiance*, jouent le rôle d'interface de liaison entre les zones. Par extension, les systèmes zones alors concernés sont énergétiquement couplés. La description informatique de notre système bâtiment va tirer profit de cette description systémique et sera détaillée dans le chapitre IV. A ce niveau, deux choses sont fondamentales:

- La description informatique va servir à assembler et connecter automatiquement les modèles des différents composants. De manière interne, totalement transparente pour l'utilisateur, l'application génère l'équivalent du chaînage du paragraphe 1.3.2.2.4, figure 19.
- Le caractère dynamique du modèle est à souligner. Pour un bâtiment donné, compte tenu des éléments qui le composent et des modèles qui leur sont associés, le modèle résultant va être unique.

#### 1.4. L'état de l'art

"Où en est la simulation thermique des bâtiments ?". La question ainsi posée pourrait obtenir autant de réponses que d'interlocuteurs, tant il est vrai que les critères d'analyse et les besoins sont multiples. Tout au plus peut-on distinguer des grandes directions :

- L'utilisation pour le cas particulier des bâtiments de logiciels d'usage général, conçus initialement pour simuler des systèmes quelconques, tels *TRNSYS* et *DOE-2*. Pour ce type de logiciel, la finalité est très large et justifie l'absence d'interface utilisateur. Cela en fait l'instrument de choix des laboratoires et de certains consultants à forte dominante scientifique. L'assemblage de modèles alors réalisé les rapproche tout à fait de la démarche analytique détaillée au paragraphe 1.3.2.2.4
- Les logiciels de simulation "classiques", (*COMFIE* [Peuportier 89], *BILGA* [Fauconnier 87], *TAS* [Brasselet 89]), se caractérisent par la préoccupation majeure d'un outil de recherche. Initialement développés par des équipes entières sur des systèmes informatiques importants, ils font en général l'objet de portages sur des machines de type *PC* ou *Macintosh*, en raison de l'accroissement de puissance de ces dernières machines. Au niveau international, certains outils de ce type, et particulier *ESP* [Clarke 85], ont réussi à s'imposer en tant que standard.
- Une autre voie est celle d'un certain modernisme, avec l'application de notions liées aux développements récents de l'informatique. L'un des plus féconds est l'intelligence artificielle (IA) donnant lieu aux systèmes experts (SE) tels que *SETIS* [Robin 91b], *THEX* [Delcambre 89] ou *IISIBAT* [Pelletret 89a]. Un autre de ces apports est celui des langages orientés objets [Wright 92].
- L'intégration de la composante thermique au processus de conception générale d'un bâtiment constitue un autre axe de développement [Augenbroe 91] [Wright 92], [Turner 92]. L'idée part du constat suivant : dans la conception assistée par ordinateur (CAO) du carénage d'une voiture, le même logiciel prend en charge la visualisation graphique des formes à des fins d'esthétique, l'analyse des déformations en cas de choc ou encore le comportement aérodynamique de l'ensemble. Quand bien même il n'y a pas autant de maisons semblables que de carénages automobiles, cette démarche

éviterait en particulier les multiples saisies d'information effectuées par différents corps d'état, cause de perte de temps (et donc d'argent pour l'entreprise) et importante source d'erreurs.

Par rapport aux classes précédentes, selon la fonction d'usage du logiciel, le support informatique de l'application, les méthodes utilisées, ..., des sous familles peuvent être construites. Cependant, chacun des logiciels offre le plus souvent différentes facettes, le classant "à cheval" sur différentes catégories. Chaque logiciel de simulation dynamique correspond en fait à un point dans l'espace des produits disponibles à un moment donné. Pour le nuage ainsi constitué, chaque acteur possède des directions principales d'évaluation et est à même d'opérer une projection sur deux ou trois dimensions l'intéressant particulièrement (voir figure 22). Son expérience ainsi que les documentations commerciales ou scientifiques disponibles l'aident en cette démarche.

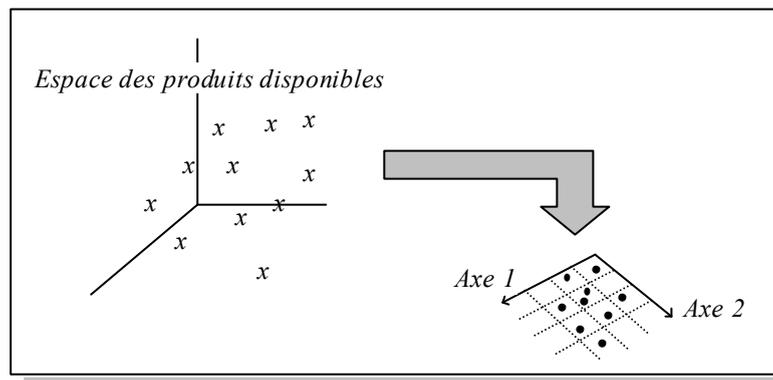


Fig. 22 : La construction d'une grille d'analyse

Pour un architecte concepteur, ces axes d'analyse privilégiés peuvent par exemple être gradués à l'aide d'estimateurs de la qualité d'usage du logiciel (facilité d'appropriation, interface de description, type de sorties, ...) et de l'aide à la conception qui lui est effectivement apportée. Pour un bureau d'études thermique, dans le cas d'une projection en trois dimensions, ces critères peuvent concerner l'état de validation du logiciel, son coût et son adéquation par rapport au métier de ce type d'acteur. Vis à vis de notre travail, l'objectif est de faire cohabiter dans un même outil de simulation des aspects a priori antinomiques, à savoir Recherche et Aide à la conception. Dans l'état actuel du produit, la prise en compte de cet aspect conception s'est principalement traduit par le choix d'une interface graphique performante (*Microsoft Windows*). L'orientation outil de recherche nous a amené à privilégier une description multizone de l'habitat, associée à un calcul effectif des débits

aérauliques. Compte tenu des deux axes définis précédemment et d'une graduation sommaire (et tout à fait subjective !), nous obtenons la segmentation suivante.

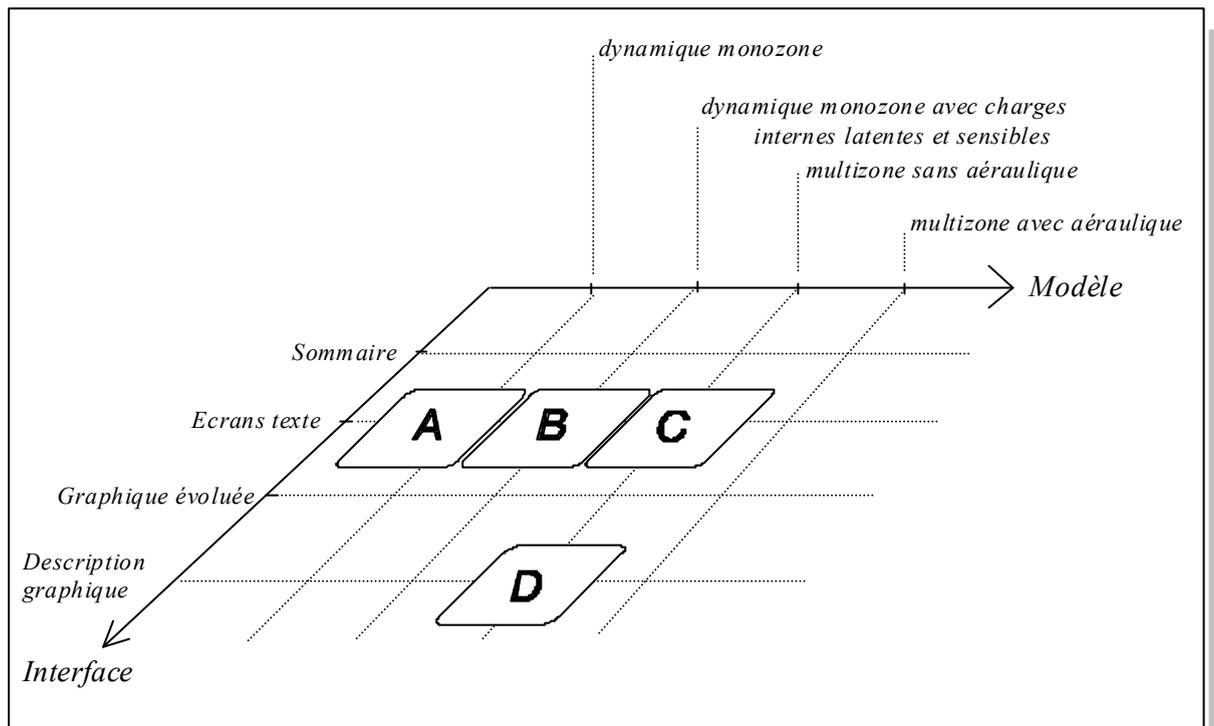


Fig. 23 : Interfaces, modèles et simulation thermique de bâtiments

*CASAMO TROPICAL* [Campana 85] appartient au groupe **A**. *CODYBA* [Brau 87], que nous décrirons plus en détail dans le chapitre V, fait partie du groupe intitulé **B**. Un exemple de logiciel appartenant au groupe **C** est *OASIS* [Raoust 88]. Plutôt novateur dans le domaine de la saisie graphique des données descriptives du bâtiment, *TES* [Drogemuller 93] ouvre la voie du groupe **D**.

### 1.5. Notre cahier des charges :

La définition du cahier des charges effectuée au démarrage de ce travail de recherche a été celle d'un outil orienté conception, détaillé et multi-modèle, de simulation thermo-aéraulique de bâtiments multizones.

#### 1.5.1. Multi-modèle :

La première caractéristique originale est celle d'un outil multi-modèle. Pour le système bâtiment, il s'agit de disposer de plusieurs modèles pour procéder à des simulations. L'idée de départ s'appuie sur la typologie effectuée au début de ce chapitre : Dans la vie d'un bâtiment (conception, réalisation et exploitation), un seul modèle du bâtiment ne peut satisfaire l'ensemble des besoins thermiques des intervenants. Par exemple, dans la phase d'avant projet sommaire, lors de l'étude d'implantation du projet sur le site, une variable pouvant intéresser le concepteur est par exemple l'énergie reçue par les différents plans, pour décider de l'exposition du bâtiment. A cette phase du projet, la base de données descriptive du bâtiment est faible, en ce que certaines données liées à la réalisation sont encore inconnues : taille des ouvertures, type de traitement d'air ou encore épaisseur d'isolant. Ainsi, un outil de calcul simple, ce qui revient à un modèle très simple du bâtiment (en particulier monozone), permettant par exemple une estimation rapide de certaines données, correspond au besoin exprimé. Lors de la phase de gestion et d'exploitation de l'ensemble construit, le bureau d'étude (par exemple au cours d'un audit énergétique) peut par exemple être amené à s'intéresser à la surchauffe d'un local donné et à vouloir tester l'influence de certaines modifications architecturales ou d'équipements. A ce moment, compte tenu des coûts engendrés (de l'étude d'audit et des modifications éventuelles), un outil de simulation détaillé s'avère nécessaire.

Un autre aspect est celui de la contrainte temps calcul associée à chaque modèle, liée aux procédures numériques utilisées et à la puissance des machines actuelles. L'excursion des périodes de simulation couvre quelques jours pour un phénomène particulier à une année complète pour l'analyse des consommations énergétiques. A ce moment, la nécessité d'apporter une réponse en temps donné et la précision souhaitée des résultats amènent le concepteur à des compromis importants.

Compte tenu des remarques précédentes, l'application sélective des modèles apparaît souhaitable. En raison de la faiblesse prévisible de certains couplages, l'idée est de permettre pour un bâtiment donné de cibler l'utilisation des modèles dits détaillés. Ainsi, la mise en avant de l'objectif précis de la simulation et des contraintes temps calcul nous conduisent à l'utilisation sélective des modèles, dont un exemple est donné au chapitre IV, dédié aux illustrations de l'application.

Au-delà de l'outil de simulation, notre objectif est donc tout d'abord de construire un générateur de modèles du bâtiment, lesquels vont permettre de réaliser des simulations.

### **1.5.2. Modularité :**

Condition impérative d'évolutivité des développements, notre application a été construite de façon très modulaire de façon à pouvoir intégrer initialement différents modèles. En conséquence, vis à vis du code de simulation, l'exploitation de résultats récents de recherche ne devrait pas poser de problèmes majeurs. De la même manière, sur les aspects concernant la description d'un bâtiment au niveau de l'interface, la complexification de l'application pourra se faire par ajout de nouveaux composants élémentaires.

### **1.5.3. Détaillé :**

La montée en puissance des micro-ordinateurs de type *PC* ou *MAC* a permis de disposer sur ce type de machines d'outils de calcul auparavant réservés aux mini ordinateurs. En parallèle, cette croissance des moyens s'est accompagnée de la mise au point de modèles prenant mieux en compte la réalité physique des échanges ou plus performants du point de vue des temps de calcul. Un exemple d'affinement est celui de la prise en compte d'une description multizone de l'habitat. Le premier problème est celui de la description d'un tel bâtiment. Une solution est proposée dans cette étude et détaillée au chapitre IV, consacré à l'architecture informatique. Un problème corollaire et non négligeable est alors celui du calcul effectif des débits échangés entre les pièces et avec l'extérieur. Intégrant le tirage thermique et les effets du vent, bénéficiant par ailleurs de modèles développés par ailleurs, le problème des transferts aéraulique fera alors l'objet du chapitre III.

Pour terminer sur nos orientations, un autre angle de vue aurait pu être de séparer les orientations conceptions thermiques de notre outil de celles liées à des préoccupations de recherche.

### **1.5.4. Aide à la conception :**

La démarche de la conception est celle de la mise en oeuvre de moyens ou de procédés pour parvenir à un but. Cette démarche se traduit par le diagramme séquentiel de la figure 24 :

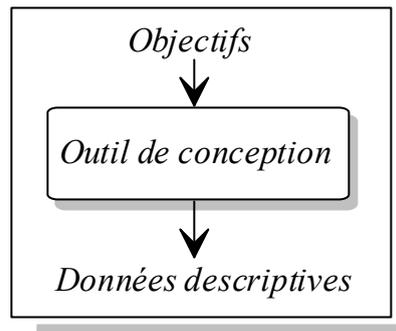


Fig. 24 : Organisation d'un outil de conception

Le problème dans la réalisation de ce type d'outil est celui du nombre de jeu de données permettant de respecter l'objectif. Compte tenu des choix des solutions à mettre en oeuvre et critères de solutions acceptables à définir, ce domaine est par excellence celui de programmes du type système expert. Cette approche n'a pas été prévue lors de l'établissement de ce cahier des charges, en partie car déjà initiée par un autre chercheur du Laboratoire Equipement de l'Habitat de l'INSA de Lyon [Robin 91b].

Utilisé en conception, un outil de simulation s'accompagne d'une démarche ascendante, utilisant comme paramètre d'entrée un objectif et en itérant jusqu'à satisfaction de critères liés à cet objectif. La figure 25 expose cette démarche. A ce moment, l'outil permet de valider ou de modifier les choix du concepteur. Il est important de noter qu'à la suite d'une simulation, aucun élément ne vient guider le concepteur dans ses choix initiaux. Les modifications à apporter au choix initiaux font appel à l'expertise thermique du concepteur. Pour l'aider dans ce sens, la démarche que nous avons retenue est de faciliter cette expertise, en permettant l'accès à des sorties particulières. Un exemple en est l'intégration au fichier résultat du rayonnement direct et diffus incident dans une zone ou encore des différents débits interzones.

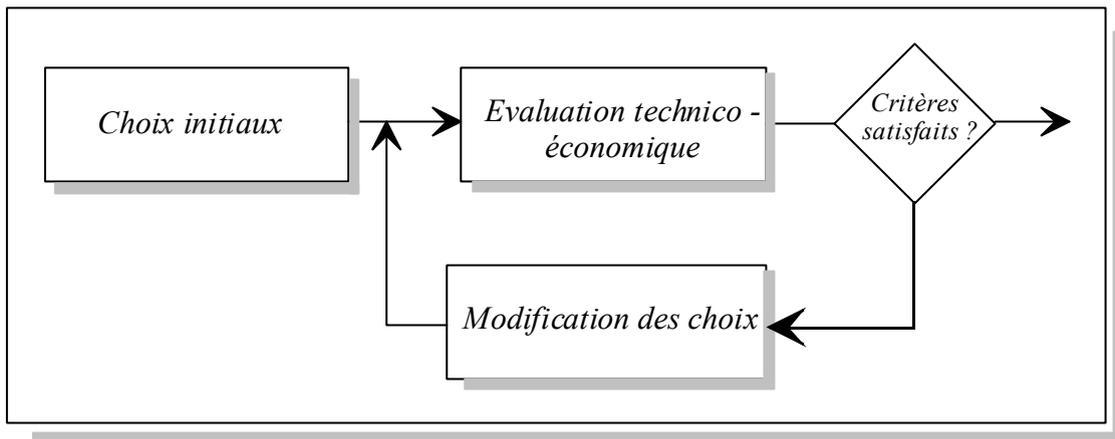


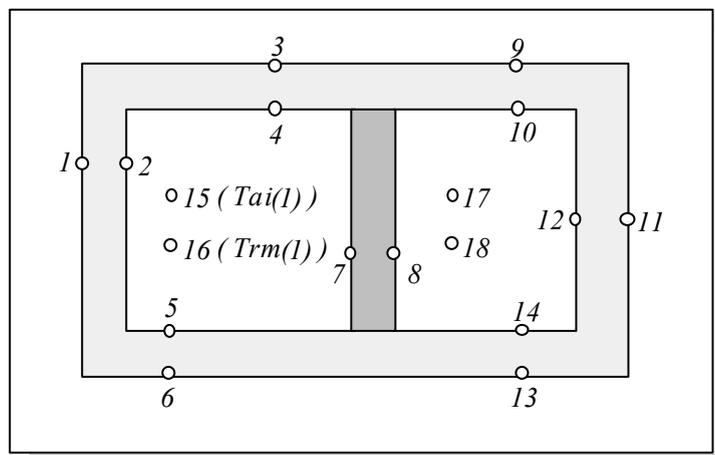
Fig. 25 : Utilisation d'un outil de simulation en conception

Malgré une certaine rigidité, compte tenu de la démarche que nous avons adoptée tendant à faciliter les prises de décision du concepteur, ce type d'outil est efficace. Cependant, se devant de respecter la culture de l'architecte, un tel outil doit être équipé d'une interface utilisateur conviviale, qui sera développée au chapitre IV. D'autres fonctionnalités allant dans ce sens seront évoquées plus en avant (gestion de bibliothèques, ...).

## 1.6. Conclusion

Au départ de connaissances n'ayant à priori que peu de rapport avec notre sujet, ce chapitre a présenté l'application de la méthode systémique à la thermique des bâtiments, démarche soulignant l'importance du sous système *zone thermique*. Les deux chapitres suivants vont présenter certains aspects fonctionnels que nous avons isolés du contexte général de l'activité conception d'un bâtiment, à savoir les transferts hygro-thermiques et aérauliques. Pour chacun de ces chapitres, la trame de la modélisation systémique, si elle est sous jacente, est quelque peu masquée par la physique des phénomènes et le formalisme associé. Nous la retrouverons au premier plan lors du chapitre consacré à l'architecture informatique de l'outil que nous avons construit.

## Chapitre II : *Le modèle hygro - thermique*







2. Chapitre II : Le modèle hygro - thermique .....	51
2.1. Introduction : .....	55
2.2. La conduction.....	56
2.2.1. Le problème physique : .....	56
2.2.1.1. Les équations physiques associées : .....	56
2.2.1.2. Les conditions aux limites : .....	56
2.2.2. Les méthodes de résolution.....	57
2.2.2.1. Les modèles d'état et leur résolution : .....	57
2.2.2.2. Les modèles basés sur les différences finies : .....	60
2.2.2.2.1. Vis à vis des variables d'espace:.....	60
Les modèles classiques : .....	62
Le modèle anamorphose : .....	64
2.2.2.2.2. Vis à vis de la variable temporelle : .....	68
2.2.3. Cas particuliers : .....	68
2.2.3.1. Le comportement conductif des vitrages : .....	68
2.2.3.2. Les parois internes : .....	69
2.2.3.3. Les transferts conductifs avec sol : .....	69
2.2.3.4. Les ponts thermiques : .....	71
2.3. La convection.....	72
2.3.1. La convection intérieure : .....	73
2.3.1.1. Coefficients d'échange constants : .....	73
2.3.1.2. Coefficients d'échange non linéaires : .....	74
2.3.2. La convection extérieure : .....	74
2.3.2.1. Les méthodes classiques : .....	75
2.3.2.2. Une nouvelle approche, le modèle de MELO : .....	75
2.4. Le rayonnement .....	78
2.4.1. Echanges intérieurs de grande longueur d'onde : .....	79
2.4.1.1. La méthode des radiosités : .....	79
2.4.1.2. La définition de la température radiante moyenne : .....	79
2.4.1.3. Le modèle simplifié intégré : .....	80

2.4.2.	Echanges intérieurs de courte longueur d'onde :.....	80
2.4.3.	Echanges de grande longueur d'onde avec l'extérieur :.....	81
2.4.4.	Echanges de courte longueur d'onde avec l'extérieur :.....	82
2.4.4.1.	Rayonnement direct :.....	83
2.4.4.2.	Rayonnement diffus :.....	84
2.4.4.2.1.	Le rayonnement diffus provenant du sol :.....	84
2.4.4.2.2.	Le diffus du ciel :.....	85
2.5.	Les transferts d'humidité.....	88
2.5.1.	Le bilan enthalpique :.....	89
2.5.2.	Le bilan sensible :.....	90
2.5.3.	Le bilan latent :.....	91
2.6.	L'assemblage et la résolution du problème thermique.....	92
2.6.1.	L'assemblage :.....	92
2.6.1.1.	Les noeuds conductifs de paroi :.....	92
2.6.1.2.	Le bilan thermo convectif du noeud d'air :.....	93
2.6.1.3.	Le bilan radiatif du noeud de température moyenne :.....	94
2.6.1.4.	Le système thermique général :.....	94
2.6.2.	La résolution :.....	95
2.6.2.1.	Les différentes méthodes de couplage :.....	96
2.6.2.2.	Choix du recouvrement pour le couplage des zones :.....	98
2.6.2.3.	Le choix d'une méthode de résolution, la connexion :.....	99
2.6.2.4.	Le choix d'une méthode numérique pour une zone :.....	101
2.6.2.4.1.	La méthode directe :.....	101
2.6.2.4.2.	La synthèse modale :.....	101
2.6.2.4.3.	Le traitement des non linéarités :.....	102
2.6.2.4.4.	L'intégration d'un système de climatisation sensible : .....	103
2.6.3.	L'implantation informatique :.....	104
2.6.3.1.	Cas général :.....	104
2.6.3.2.	Exemple :.....	105
2.7.	Conclusion :.....	107

## 2.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à une présentation de certains des modèles des phénomènes physiques régissant les transferts de chaleur au sein d'un bâtiment. Cette présentation ne prétend pas être exhaustive, mais, en conservant à l'esprit notre objectif de calcul, elle permet d'exposer les raisons nous ayant conduit à certains choix. L'accent est ainsi mis sur les aspects de modélisation, leur incidence étant forte vis à vis d'un outil de conception.

La démarche présente tout d'abord les phénomènes conductifs. La raison principale tient à notre vision du problème physique, considérant que les autres modes de transfert permettent de déterminer les conditions aux limites des équations du problème de conduction. Si cette vision est adaptée aux climats tempérés, elle est cependant plus discutable en climat tropical. En effet, les phénomènes aérauliques, jusqu'à maintenant mal maîtrisés, régissent le plus souvent à eux seuls les transferts, ce en raison de leur prédominance par rapport aux autres modes de transfert.

Les transferts d'humidité, ne posant pas à notre niveau de problème majeur avec les hypothèses classiques, sont intégrés et permettront d'accéder à des exploitations futures liées au confort thermique.

Nous abordons ensuite l'organisation des traitements de notre module de simulation hygro-thermique et de nos données de calcul.

## 2.2. La conduction

Du point de vue microscopique, ce mode d'échange tend à une distribution homogène de l'énergie cinétique moyenne des diverses particules, par un phénomène de diffusion, des zones où la valeur moyenne de l'énergie (donc de la température) est élevée vers les zones où elle est plus faible. Dans un milieu isotrope et homogène, le tenseur conductivité se réduisant à un scalaire (la conductivité thermique  $\lambda$ ), la loi dite de Fourier relie en un point densité de flux et gradient de température :

$$\vec{\phi} = -\lambda \text{grad } T$$

### 2.2.1. Le problème physique :

#### 2.2.1.1. Les équations physiques associées :

Le bilan énergétique d'un volume de contrôle permet d'établir, pour un milieu homogène et isotrope l'équation :

$$\Delta T - \frac{\rho C}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} (\text{grad } T)^2 + \frac{p}{\lambda} = 0$$

Pour un milieu de caractéristiques thermophysiques indépendantes de la température, sans terme lié aux sources internes, l'équation dite de Fourier s'écrit alors

$$\Delta T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \text{avec } a = \frac{\lambda}{\rho C}, \text{ diffusivité thermique [W/m}^2\text{.K]}$$

#### 2.2.1.2. Les conditions aux limites :

En plus des conditions initiales, l'association de l'équation précédente et des conditions aux limites détermine l'évolution du champ de températures. Ces dernières sont habituellement de trois types. Pour le premier - Dirichlet -, la température de surface est imposée, alors que pour la condition de Neuman, le flux surfacique est imposé. Le troisième type de condition limite est celui de Fourier, pour lequel le transfert de chaleur à l'interface du solide et de l'autre milieu (généralement fluide) est une fonction de la température de surface. Si cette dépendance est linéaire et fait intervenir l'écart de température entre la surface du solide et celle du fluide loin de la surface de contact, le coefficient de proportionnalité entre densité de flux échangée et l'écart de température porte alors le nom de coefficient d'échange.

Dans le cadre de la thermique de l'habitat, pour les parois d'enveloppe, les conditions limites réalistes sont celles de Neuman et Fourier. D'autre part, vis à vis du couplage des modes de transferts de chaleur, seuls ces deux derniers types de conditions permettent de faire intervenir les

flux radiatifs et convectifs comme conditions limites aux surfaces considérées, traduisant ainsi le couplage de la conduction avec les échanges superficiels.

### 2.2.2. Les méthodes de résolution

La solution analytique, utilisant la technique de séparation des variables, fait tout d'abord apparaître dans la solution du système homogène (conditions aux frontières nulles) les fonctions propres en température du système. La solution analytique du système complet, à l'aide du théorème de Duhamel, fait intervenir pour chacune des faces un produit de convolution. Dans le cas d'un mur monocouche, la difficulté de la résolution analytique est déjà réelle. La généralisation à un nombre de couches quelconque posant problème, il est le plus souvent fait appel aux modèles numériques.

#### 2.2.2.1. Les modèles d'état et leur résolution :

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

Le vecteur d'état d'un système est le vecteur nécessaire à la connaissance de son état physique. Il constitue l'information minimale à connaître à un instant donné pour pouvoir prédire son évolution future, lorsque l'évolution des commandes et perturbations agissant sur le système en question est connue.

En Automatique des systèmes linéaires multivariables [Gille 84], en négligeant le terme lié aux perturbations, l'écriture sous forme matricielle des équations différentielles régissant le phénomène étudié conduit à une équation du type

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

dite équation d'état.

Les éléments portent les noms suivants :

$A$	matrice d'évolution
$B$	matrice d'application de la commande

$U$  vecteur commande  
 $X$  vecteur d'état

D'un point de vue physique, dès lors qu'il y a stockage d'énergie (électrique dans le cas des réseaux, mécanique dans le cas des systèmes oscillants ou encore calorifique pour les systèmes thermiques) et que les phénomènes sont linéarisés, ce formalisme se retrouve et permet l'utilisation de concepts et de techniques de résolution spécifiques.

Avec les hypothèses de linéarité et d'invariance du problème à résoudre, nous nous intéressons à une paroi de couches homogènes et isotropes, dans laquelle nous supposons le flux de chaleur conductif comme unidirectionnel. Par ailleurs, nous supposons avoir en surface des conditions limites du type températures imposées.

Dans le cas de la thermique [André 92], le vecteur  $X(t)$  est le plus souvent le vecteur champ de température du système. L'équation d'état s'écrit alors sous la forme :

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

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

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

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

Dans les problèmes qui nous concernent, les sorties correspondent aux températures, et nous avons alors  $D = [Id]$  (matrice identité) et  $E = [0]$  (matrice nulle).

Dans le cas général, les deux équations précédentes répondent au diagramme fonctionnel de la figure 26 suivante :

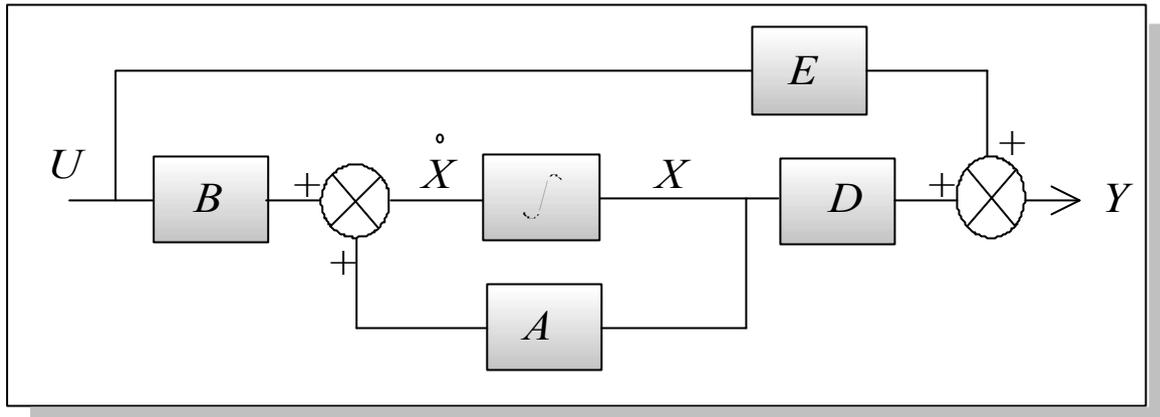


Fig. 26 : Schéma fonctionnel des modèles d'état

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

$$X(t) = e^{At} X(t_0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B(t) U(\tau) d\tau,$$

dans laquelle sont aisément reconnaissables la réponse libre du système (cas du refroidissement par exemple) et la réponse forcée.

Appliquée au phénomène de conduction dans une paroi, la mise en oeuvre de l'analyse modale ([Lefebvre 87], [Bacot 88]), issue de l'Automatique, consiste à passer dans la base propre du système, dans laquelle la matrice d'évolution  $A$  est diagonale. Après classement des valeurs propres, la réduction modale conduit alors à ne considérer que les valeurs propres les plus importantes. Le système d'équations à résoudre est alors d'une dimension nettement inférieure à la dimension du vecteur d'état, sans réduction notable de la précision obtenue. Signalons au passage que cette méthode constitue, en plus d'une méthode de résolution élégante, des outils d'analyse du comportement du système étudié.

Dans le cas de la discrétisation numérique de la variable temps, avec l'hypothèse d'invariance ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  ne dépendent pas du temps), le système d'équations à résoudre devient

$$\begin{cases} \dot{X}^{k+1} = A X^k + B U^{k+1} \\ Y^{k+1} = C X^{k+1} + D U^{k+1} \\ X^0 = X_0 \end{cases}$$

$k$  indiquant le pas de temps.

### 2.2.2.2. Les modèles basés sur les différences finies :

Ces méthodes sont basées sur la discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur.

#### 2.2.2.2.1. Vis à vis des variables d'espace:

Pour une paroi d'enveloppe, nous supposons avoir deux températures comme conditions aux limites. Avec l'hypothèse d'unidirectionnalité des transferts conductifs, le domaine d'étude est alors découpé en un nombre fini d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme (3 sur la figure 27).

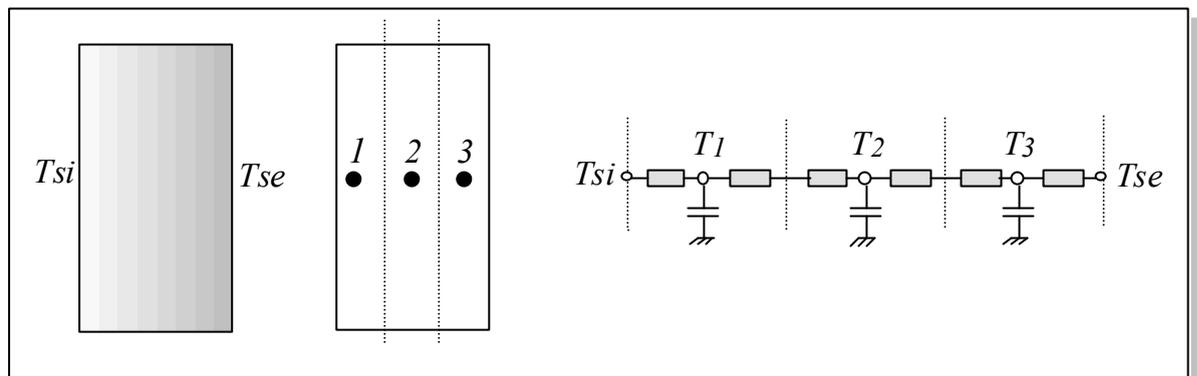


Figure 27 : Discretisation spatiale d'une paroi

L'analogie formelle entre l'équation de conduction de Fourier et la loi d'Ohm dans un conducteur conduit, après considération des équations suivantes,

$$\vec{\varphi} = -\lambda \mathbf{grad} T, \quad \vec{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{grad} V$$

à la correspondance entre les groupements suivants  $(\varphi, j)$  ,  $(\lambda, \rho^{-1})$  et  $(T, V)$

La transposition du problème thermique de conduction en un problème de conduction électrique est alors connue sous le nom d'analogie thermo électrique. Exploitant cette analogie, La méthode nodale ([Saulnier 85]) conduit à la mise en place d'un réseau électrique. Les noeuds, qui au sens électrique symbolisent des équipotentielles, correspondent alors à des isothermes. Appliqué à la conduction monodimensionnelle dans une paroi, ces éléments isothermes sont les tranches isothermes issues des hypothèses de discrétisation. Ces noeuds sont alors reliés entre eux par la résistance analogique de la couche physique de paroi les séparant. D'autre part, chacun de ces noeuds se voit attribuer une capacité électrique, traduisant la capacité thermique de la portion de paroi correspondante, et permettant ainsi de traduire les effets de l'inertie thermique. En appliquant alors la loi de conservation des courants en chacun de ces points (loi de KIRCHOFF), la résolution du

problème aux dérivées partielles se ramène à celle d'un système algébro-différentiel. Si le nombre de noeuds de discrétisation est  $n$ , le système obtenu est le suivant.

$$\begin{cases} C_1 \frac{dT_1}{dt} = K_{si,1}(T_{si} - T_1) + K_{1,2} (T_2 - T_1) \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} = K_{1,2} (T_1 - T_2) + K_{2,3} (T_3 - T_2) \\ \dots \\ C_n \frac{dT_n}{dt} = K_{n-1,n} (T_{n-1} - T_n) + K_{n,se} (T_{se} - T_n) \end{cases}$$

avec  $C_i$  capacité thermique du noeud  $i$   
 $K_{i,j}$  conductance entre  $i$  et  $j$

Ce qui s'écrit encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dots \\ \dot{T}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ K_{1,2} & -K_{1,2} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -K_{n,s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{n,se} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{si} \\ T_{se} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

L'équation différentielle matricielle constitue en fait l'équation d'évolution d'état du système, compte tenu de sa discrétisation. Par ailleurs, l'équivalence de la méthode nodale et des différences finies appliquées aux variables d'espace pouvant être démontrée, ([Roux 84]) nous ferons dans la suite de notre travail référence à cette méthode et au schéma électrique qui en découle.

Différents filtres RC permettent ainsi d'identifier la réponse d'une paroi multicouche. L'ordre du filtre présume de la précision de l'identification obtenue, et correspond au nombre de capacités présentes dans le modèle électrique. Nous présentons rapidement les modèles classiques utilisés dans les logiciels de simulation, ainsi qu'un modèle original, le modèle anamorphose.

### Les modèles classiques :

Obtenu au départ du bilan énergétique effectué pour la paroi globale, le modèle analogique dit "R2C" (une résistance, deux capacités) identifie la paroi à un filtre du deuxième ordre, dans lequel les capacités sont placées aux deux extrémités du filtre. Ce modèle est illustré par la figure 28 :

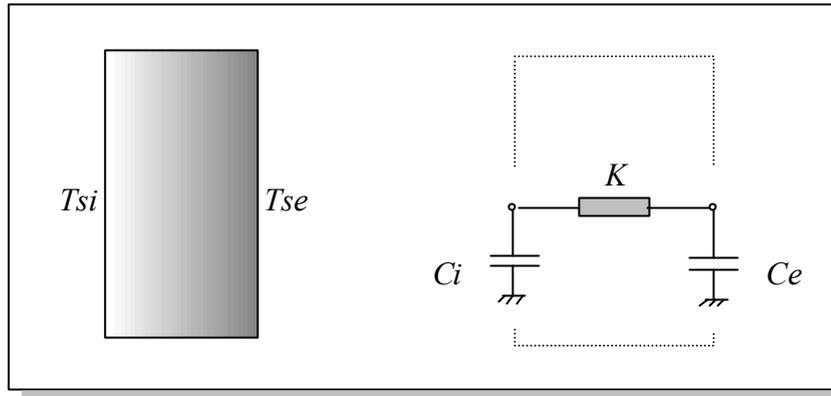


Fig. 28 : Modèle "R2C" d'une paroi

L'expression littérale de la valeur des composants électriques s'obtient simplement au départ des caractéristiques thermo physiques des constituants de la paroi. Si la paroi possède  $N_c$  couches, la couche  $k$  ayant les caractéristiques  $e_k$ ,  $\lambda_k$ ,  $\rho_k$  et  $c_k$ , nous avons les relations suivantes [Brau 82]:

$$R_k = \frac{e_k}{\lambda_k}, \quad K = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=N_c} R_k}$$

$$C_e = \sum_{k=1}^{k=N_c} \rho_k c_k e_k (1 - \beta_k), \quad C_i = \sum_{k=1}^{k=N_c} \rho_k c_k e_k \beta_k$$

avec  $\beta_k = K \frac{R_k}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} R_i$

L'implantation des capacités en surface est intéressante du point de vue numérique car elle permet de diminuer le nombre d'équations du problème. Cependant, distribuer l'inertie de la paroi directement sur les noeuds de surface est intuitivement peu satisfaisant du point de vue physique. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle détaillé tridimensionnel, montre en effet que la valeur des capacités à attribuer aux noeuds de surface est très faible. En ayant à l'esprit le caractère multizone de notre outil, l'utilisation d'un modèle 2RC pour une paroi de séparation entre deux zones (que nous appellerons paroi d'inter-ambiance) conduit ainsi à une imprécision importante sur la température des noeuds de surface. Dans le cas d'un suivi fin des températures, cela est problématique, car ces derniers noeuds assurent physiquement le couplage conductif entre les zones. L'erreur engendrée sera alors maximale si le couplage entre deux zones ne fait intervenir que ce mode de couplage. Un exemple en est donné par le cas des dalles entre deux étages d'un bâtiment.

L'inconvénient précédent conduit à un autre modèle, du même ordre, mais correspondant à une distribution des deux capacités dans le volume de la paroi. Le filtre obtenu, représenté figure 29, est alors du type "3R2C" et comporte 4 noeuds [Rumianowsky 89] :

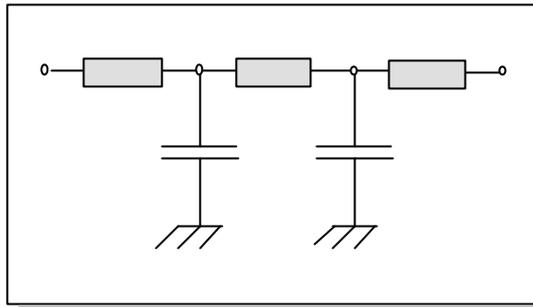


Fig. 29 : Modèle "3R2C" d'une paroi

Le problème qui se pose alors est celui de la disposition spatiale des noeuds capacitifs. Une démarche semi-empirique parfois utilisée dispose respectivement ces deux noeuds au quart et aux trois quarts de l'épaisseur physique de la paroi.

Nous n'avons pas passé en revue les autres modèles (2RC, 2R3C, ...) car le principe général est le même. Toutefois, le rapport entre ces différents modèles électriques et les méthodes de transfert est à retenir. Ces méthodes caractérisent une couche au travers d'une matrice de transfert, reliant le vecteur température - flux de sortie à celui d'entrée. Les termes de cette matrice sont par exemple exprimés à l'aide de la variable de Laplace,  $p$ . La caractérisation d'une paroi multicouche se fait au travers de sa matrice de transfert, obtenue comme produit des matrices de transfert des différentes couches qui la composent. Les termes de cette matrice produit font alors intervenir des sinus et cosinus hyperboliques. Compte tenu de l'analogie thermo-électrique, le modèle électrique s'obtient en identifiant chacun des termes de la matrice de transfert avec les termes correspondants de la matrice de transfert (électrique) du filtre envisagé. L'identification nécessitant la troncature des termes de la matrice produit, l'ordre termes conservés égale l'ordre du filtre choisi, c'est à dire encore le nombre de capacités de ce filtre.

Tous les modèles vus précédemment procédaient à une globalisation des couches d'une paroi complexe. Un modèle différent, directement issu de la discrétisation spatiale, se propose de disposer au sein de chaque couche un nombre de noeuds paramétrable. Ce modèle, dit "couche par couche", présente l'avantage de s'affranchir des problèmes liés à la distribution de la capacité totale de la paroi. Il est cependant pénalisant au niveau temps de calcul, vu le nombre d'équations qu'il génère (une équation de bilan par noeud). Plus en détail, dans chaque couche, le modèle choisi est du type  $(n-1)R(n-2)C$ ,  $n$  étant le nombre de noeuds de discrétisation de la couche considérée. Ce type de filtre permet au passage de ne pas disposer de capacités en surface. A l'interface entre deux couches accolées, il est nécessaire de placer un noeud de liaison (ce qui est automatique en raison du type choisi), et l'équation de bilan qui lui est associée traduit l'égalité des flux conductifs de part et d'autre de l'interface.

### Le modèle anamorphose :

Les transformations anamorphoses appliquées à la conduction en régime dynamique dans les parois multicouches ont fait l'objet de publications à caractère analytique : [Gosse 78] et [Gosse 84]. A l'aide de la méthode de Fourier, l'objet est alors d'adimensionner l'équation de la chaleur de façon à avoir une même valeur propre commune à toutes les couches homologues. Notre propos est ici purement numérique, l'anamorphose conduisant à un modèle particulier de discrétisation de parois multicouches.

En introduction, intéressons nous au profil de températures d'une paroi multicouches en régime permanent. Sur le cas illustré figure 30, la deuxième couche, plutôt isolante, est le siège d'un gradient de température important. Notons au passage les ressauts de température au voisinage des interfaces et dus à l'existence de résistances liées au contact des couches entre elles.

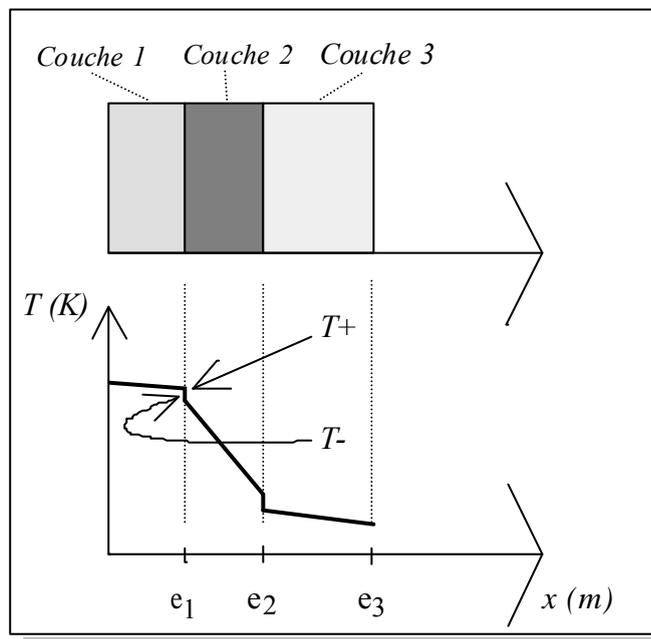


Fig. 30 : Profil de température dans une paroi en régime permanent

Au niveau de l'interface de deux couches que nous indiquerons par 1 et 2, une première équation exprime la continuité du flux conductif.

$$\lambda_1 \frac{dT_-}{dx} = \lambda_2 \frac{dT_+}{dx}$$

Si le contact entre les deux couches est parfait, il y a égalité des températures de part et d'autre. Si tel n'est pas le cas, la prise en compte d'une résistance de contact  $R_c$  permet d'assurer la continuité des températures au travers de l'équation suivante :

$$(T_+) - (T_-) = R_c \lambda_2 \frac{dT_+}{dx}$$

La confrontation des équations précédentes et des modèles classiques de discrétisation de la paroi amène plusieurs remarques :

- Par rapport au modèle couche par couche, la première équation traduit la nécessité de disposer des noeuds à l'interface des différentes couches pour assurer la liaison physique. Soit un maillage comportant un certain nombre de noeuds par couche et considérons le profil des températures faisant suite à un régime dynamique quelconque. Vis à vis de la résolution numérique, dans les zones de faible résistance thermique, le gradient de température étant faible, l'erreur engendrée par la discrétisation sera moindre que celle dans la partie très résistive.

- La discontinuité des températures au voisinage de l'interface pose deux problèmes. Le premier est celui de la valeur à attribuer à la résistance de contact. Dépendant de la nature des corps en contact, des états de surface ou encore de la pression mécanique exercée, ces résistances de contact sont souvent négligées [Barrere 89]. Dans l'habitat utilisant les techniques d'isolation (mettant donc en jeu des résistances thermiques élevées), cette simplification est certainement justifiée [Gery 90]. Une fois cette valeur de résistance déterminée, le second écueil est celui de sa prise en compte à l'aide des modèles classiques. A la différence des couches, cette résistance de contact ne correspond pas à une épaisseur d'un matériau donné. Pour en tenir compte, il faut par exemple introduire une couche d'un matériau fictif (dont chaleur massique nulle pour ne pas introduire d'effet capacitif), couche dont la résistance thermique égale celle du contact.

- Rappelons qu'entre le problème lié au modèle 2RC et la lourdeur numérique du modèle couche par couche, les modèles intermédiaires classiques sont pénalisés par des difficultés d'identification, qui se traduisent par les problèmes de disposition dans l'espace des noeuds capacitifs.

Le modèle anamorphose se propose d'apporter des réponses à ces problèmes. Un changement de variable adéquat ( $x$  devient  $x^* = x / \lambda$ ) amène tout d'abord la continuité du gradient et des températures au niveau de l'interface entre les couches. En effet, si  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  désignent les conductivités thermiques respectives des deux dernières couches,  $T_+$  et  $T_-$  les températures de part et d'autre de l'interface, l'équation de conservation des flux s'écrit alors

$$\lambda_1 \frac{dT}{dx} = \lambda_2 \frac{dT}{dx} \Rightarrow \frac{dT_-}{d\left(\frac{x}{\lambda}\right)} = \frac{dT_+}{d\left(\frac{x}{\lambda}\right)}$$

Les profils de températures, avant et après la transformation anamorphose, sont les suivants :

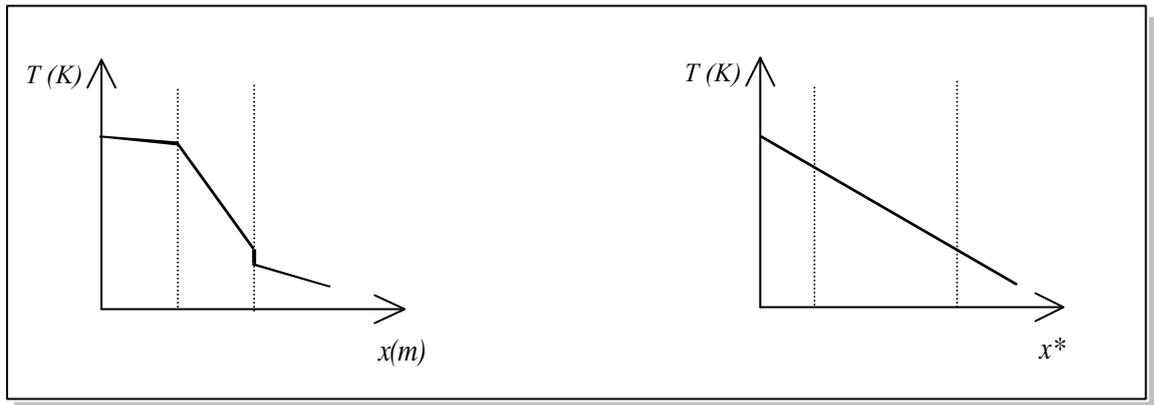


Fig. 31 : Profils de température, avant et après transformation

Chaque couche physique est donc remplacée par sa résistance thermique. Vis à vis de la variable  $x^*$ , la résistance de contact apparaît alors implicitement, comme une couche d'épaisseur résistive  $R_c$ .

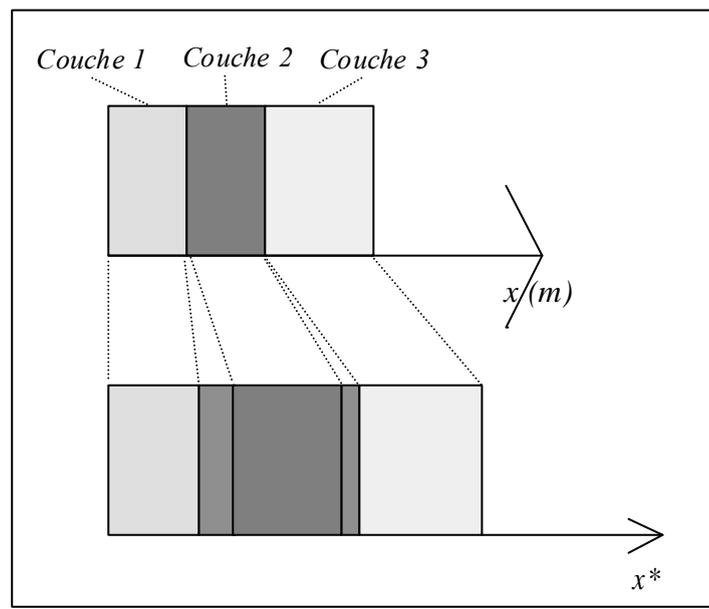


Fig.32 : La transformation anamorphose

La paroi se comporte donc comme une paroi homogène et peut donc faire l'objet d'une discrétisation quelconque. Il n'est ainsi plus nécessaire d'introduire les noeuds de liaison à l'interface des couches. Etant donné  $N (> 2)$  le nombre de noeuds de discrétisation souhaité, l'utilisation de ce modèle revient au découpage de la paroi en  $(N-2)$  tranches (ou mailles) de même résistance. De plus, leur somme doit égaler la résistance totale de la paroi, que nous noterons  $R_{tot}$ , et que l'on sait être égale à  $\sum_k \frac{e_k}{\lambda_k}$ .

La discrétisation que nous choisissons alors dispose un noeud au centre (résistif) de chaque tranche, auquel on attribue la capacité thermique  $C_t$  de la tranche. Le modèle analogue d'une tranche est alors donné sur la figure ci-contre :

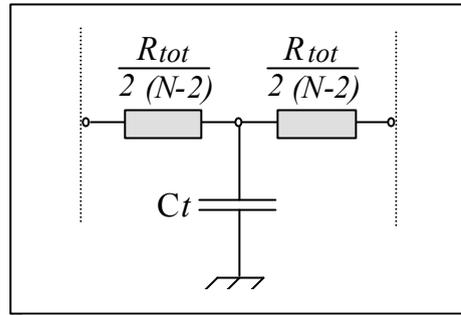


Fig. 33 : Modèle électrique d'une tranche.

Le modèle global de la paroi est obtenu en accolant chacun des modèles de tranches et répond au schéma de la figure 34 :

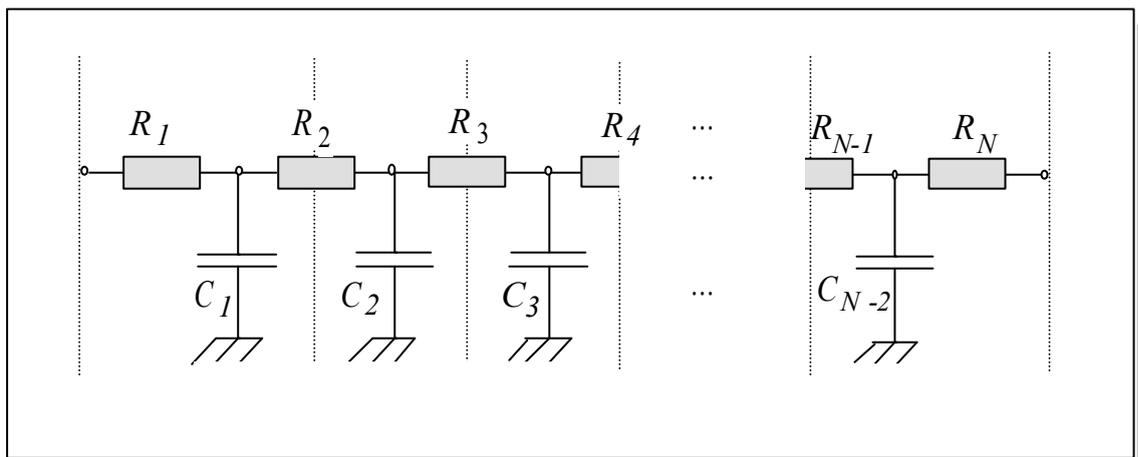


Fig. 34 : Assemblage des modèles de tranches

La valeur des résistances est alors  $R_1 = R_N = \frac{R_{tot}}{2(N-2)}$  et  $R_2 = R_{N-1} = \frac{R_{tot}}{(N-2)}$ .

Le calcul des capacités nécessite la connaissance de la répartition spatiale des tranches. Il est en effet nécessaire de savoir quelle part de chaque couche physique concerne une tranche donnée. A ce moment, la capacité affectée à la tranche est celle des différentes portions de couches. L'algorithme du modèle anamorphose a été reporté en annexe A.

Ce modèle ayant été explicité, abordons l'intérêt qu'il présente à notre égard. Vis à vis de la variable d'espace, il apparaît que le modèle anamorphose conduit à un maillage plus fin dans les couches isolantes que dans les couches conductrices. Replaçant le problème dans un contexte sensiblement plus large, ce modèle permet d'affiner automatiquement le maillage du domaine à

l'endroit des forts gradients. Il va sans dire qu'intuitivement, ce modèle sera plus intéressant vis à vis du compromis temps de calcul et précision. Le chapitre V verra l'une des illustrations du logiciel consacrée à la comparaison de modèles conductifs de paroi et mettant en évidence l'intérêt du modèle anamorphose.

#### **2.2.2.2.2. Vis à vis de la variable temporelle :**

Evoquée lors du modèle d'état discret, cette discrétisation temporelle est une caractéristique commune des outils de simulation. Dès lors, à chaque pas de temps, le vecteur cherché est solution de l'équation

$$C \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \Theta (A T(t + \Delta t) + B U(t + \Delta t)) + (1 - \Theta)(A T(t) + B U(t))$$

$\Theta$  paramètre lié au schéma

Les différents schémas de calculs étant bien connus, nous n'avons implanté que le schéma implicite ( $\Theta = 1$ ), nécessitant la résolution d'un système, mais inconditionnellement stable ([Gery 90], [Fauconnier 80]). Le choix de ce schéma est motivé par les instabilités prévisibles de celui semi-implicite, les constantes de temps de certaines parois pouvant être faibles devant le pas de temps [Gilles 88].

#### **2.2.3. Cas particuliers :**

##### 2.2.3.1. Le comportement conductif des vitrages :

Devant les faibles valeurs de leur coefficient d'absorption et de leur capacité thermique, les vitrages seront toujours considérés en régime permanent vis à vis des transferts conductifs.

##### 2.2.3.2. Les parois internes :

Les parois internes à un volume d'air supposé isotherme (appartenant à une zone thermique) sont sollicitées symétriquement en température (figure 35). En raison des modèles des échanges superficiels intérieurs intégrés, la symétrie est aussi respectée vis à vis des flux. Ces parois ne jouent alors de rôle que vis à vis de l'inertie.

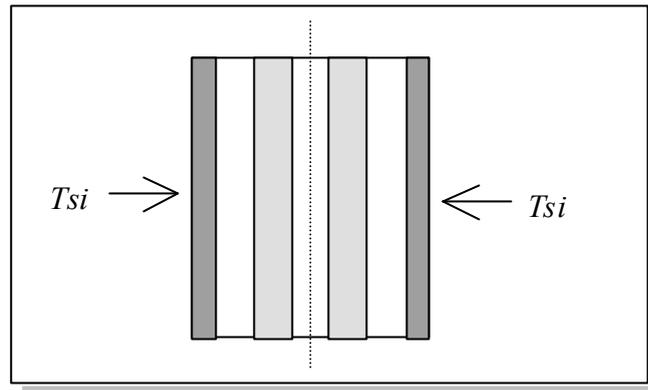


Fig. 35 : Sollicitation en température d'une paroi interne

L'usage habituel permet par ailleurs de supposer une symétrie dans la constitution physique. Les hypothèses précédentes nous amènent à considérer pour une paroi interne un plan de flux nul, qui permet de ne conserver que la demi-paroi vis à vis du modèle. En adoptant au départ un schéma 2RC, le schéma analogique devient, après repliage, du type RC.

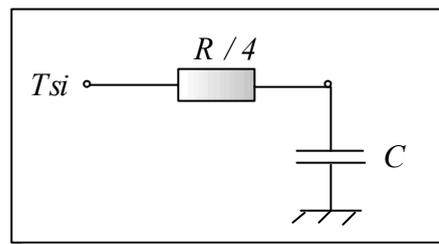


Fig. 36 : Modèle "RC" d'une paroi interne

### 2.2.3.3. Les transferts conductifs avec sol :

Bien intégré par les concepteurs, la prise en compte du sol en thermique d'été (à des fins de refroidissement) et en thermique d'hiver (limitation des déperditions) se heurte à des obstacles de modélisation de taille. En effet, le problème thermique à travers le plancher bas présente certaines caractéristiques qui en font un mode de transfert complexe :

- Caractère tridimensionnel des transferts thermiques
- Hétérogénéité du sol, dont les caractéristiques thermophysiques varient de manière importante avec l'humidité
- Inertie du sol très supérieure à celle des autres éléments du bâtiment.
- Problème de définition des conditions aux limites.

Les modèles analytiques ne pouvant traiter que des configurations simples, les modèles numériques par éléments finis ou différences finies sont les plus employés. Ces derniers sont malgré

tout limités à l'étude de ces transferts en régime permanent, en raison des temps de calculs prohibitifs du régime variable. Pour contourner cet inconvénient, des approches du problème à l'aide de l'analyse modale ont été menées ([Moktari 88]) et permettent de résoudre ainsi le problème du couplage des locaux avec le sol.

Dans l'état actuel de nos travaux, en raison d'un souci de cohérence de la complexité des modèles mis en oeuvre, nous avons conservé l'approche unidirectionnelle, en s'attachant à la définition de la condition limite. Le sol est alors modélisé par une paroi particulière. Les outils de simulation simplifiée diffèrent au niveau de la condition limite en face inférieure de cette paroi. La température du sol est alors supposée constante ou égale à celle de l'air extérieur.

Nous avons choisi une condition limite moins restrictive, de type Neuman, dite de flux nul. Le flux conductif en sous face de la paroi sol est supposé nul.

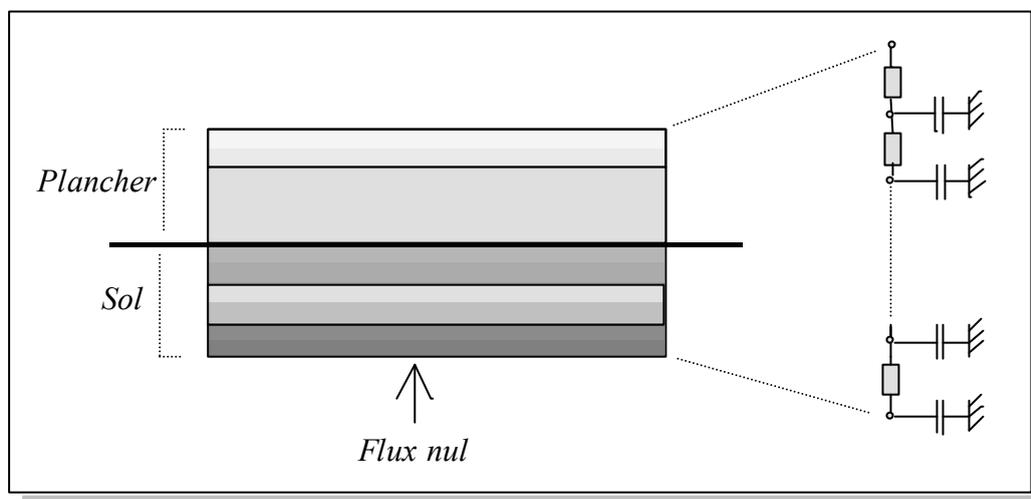


Fig. 37 : Modélisation des échanges conductifs avec le sol

Le schéma de la figure 37 montre la juxtaposition de la paroi plancher (intrinsèque au bâtiment) de la paroi sol (ou terre plein). Vis à vis du modèle électrique (symbolisé à droite), les deux quadripôles correspondant aux parois précédentes sont en série. La condition physique de flux nul au noeud extrême se traduit par la terminaison du réseau en ce point (aucune connexion au départ de ce noeud).

#### 2.2.3.4. Les ponts thermiques :

Dans un bâtiment, les ponts thermiques sont des lieux très fréquents où les isothermes ne peuvent plus être considérés comme planes, tels que le plancher (poutrelles et hourdis), les angles de parois ou les encadrements de baies. Le cas des échanges avec le sol ayant été vu précédemment, nous ne nous intéressons qu'aux autres types de ponts thermiques. Pouvant en particulier être le siège de déperditions importantes en thermique d'hiver, la modélisation de ces transferts se pose alors.

L'hypothèse d'unidirectionnalité des transferts conductifs dans les parois se prête mal à l'intégration en régime dynamique des ponts thermiques, ces derniers intervenant dès lors que le transfert de chaleur ne répond plus à cette hypothèse. En régime permanent, le pont est caractérisé par un coefficient de transmission linéique dont les valeurs les plus courantes sont données dans les documents réglementaires [CSTB 90]. L'intégration dans un code de simulation dynamique peut alors se faire selon deux voies principales :

- La première, simplifiée, consiste à ne caractériser le pont que par cette donnée du régime permanent. Les ponts thermiques se traduisent par une majoration des conductances trouvées sans leur prise en compte. Par nature même, si cette méthode est simple, elle ne donne des résultats précis au niveau des déperditions dues aux ponts thermiques qu'à une échelle importante.

- La seconde méthode, plus réaliste, vise à l'utilisation pour le pont thermique de facteurs de réponse linéiques [Achard 80]. Ces facteurs de réponse doivent cependant être préalablement déterminés à l'aide d'une méthode du type éléments finis et par exemple stockés dans une bibliothèque. L'intégration d'un tel modèle des ponts thermiques est alors possible dans un code de simulation dynamique, quel que soit le modèle des transferts de chaleur conductifs choisi, en raison de la possibilité d'uniformisation syntaxique des différents modèles [Perez Sanchez 89]. Cependant, cette méthode reste d'une utilisation assez lourde.

Actuellement, dans notre outil, nous n'intégrons pas ces effets. Conséquence importante, le calcul des coefficients réglementaires, nécessitant la prise en compte des ponts thermiques, n'est pas proposé dans l'état actuel de notre outil. Pour faire la liaison avec la description du bâtiment (chapitre IV), lors de leur intégration future, les ponts thermiques seront des composants d'inter ambiance.

### 2.3. La convection

Les principales conclusions d'un précédent rapport de l'IEA (International Energy Agency) concernaient la limitation de la précision des codes de calculs en raison des transferts aérauliques et des transferts convectifs [Irving 82]. Dans cette partie, nous ferons le point sur les modèles physiques existants de la convection en vue de l'intégration de certains d'entre eux dans notre outil.

Traduisant les échanges de chaleur entre un fluide et un élément donné, les échanges superficiels par convection obéissent à des phénomènes complexes qui font depuis de nombreuses années l'objet de recherches, à la fois sur le plan théorique et expérimental. La classification usuelle sépare les phénomènes de convection forcée et de convection naturelle. Pour la première catégorie, le mouvement du fluide est dû à un élément externe tel que ventilation mécanique ou le vent, alors que pour la seconde, ce mouvement est dû à l'action combinée du champ de pesanteur et de la différence de densité du milieu ambiant due au champ thermique (Poussée d'Archimède).

Les modèles de convection détaillés les plus utilisés sont des formulations expérimentales, fonction des nombres adimensionnels caractéristiques de l'écoulement. Issues de l'analyse dimensionnelle, et de l'application du théorème de Vashy-Buckingham, ces formulations sont exprimées le plus souvent sous la forme  $Nu = f(Gr, Pr)$  en convection naturelle et  $Nu = f(Pr, Re)$  en convection forcée. Elles sont rarement utilisées directement dans les programmes de simulation, principalement en raison des non linéarités alors introduites. En effet, le nombre de Grashof ( $Gr$ ) est une fonction linéaire de l'écart de température caractéristique, c'est à dire l'écart entre température de surface et celle du fluide. Cependant, dans la relation expérimentale évoquée précédemment,  $Gr$  intervient au travers d'une puissance fractionnaire. De plus, ces derniers modèles, ne correspondant qu'à des cas de géométrie simple, ne peuvent que difficilement faire l'objet d'une intégration réaliste dans un code de calcul. La connaissance de ces modèles est toutefois intéressante, comme nous en verrons un exemple dans le chapitre concernant le modèle aéraulique (modèle de Walton pour les grandes ouvertures).

Vis à vis de la thermique de l'habitat, les flux convectifs aux surfaces de parois sont nos inconnues. Ces flux interviennent alors comme l'une des composantes des conditions aux limites du problème de conduction évoqué précédemment (l'autre composante étant constituée des flux radiatifs). La remarque précédente, associée à la facilité de prise en compte des conditions aux limites de type Fourier, guide à l'intégration de modèles convectifs linéaires (loi de Newton), exprimant le flux recherché sous la forme

$$\Phi_{cv} = S h_c (T_s - T_a) \quad [\text{W}]$$

Dans le cas de la convection intérieure et extérieure, la valeur du coefficient  $h_c$  est liée au nombre de Nusselt ( $Nu$ ), lequel est issu de corrélations expérimentales sur des plaques planes. Ainsi,

une forte dispersion des valeurs selon les auteurs est notable. Toutefois, les modèles newtonniens sont largement implantés dans les modèles de simulation thermique de l'habitat, avec des niveaux de finesse d'analyse que nous allons maintenant aborder.

### 2.3.1. La convection intérieure :

Il s'agit, au sein d'une pièce d'habitation de modéliser le couplage convectif entre l'air de la zone et les parois constitutives de l'enveloppe. Une première hypothèse courante, l'isothermie du volume d'air de la zone, restreint d'emblée le champ d'action des modèles proposés. C'est ainsi que pour les grands volumes, l'effet de la stratification thermique de l'air est alors problématique. Cette stratification explique en partie la difficulté de la détermination du coefficient d'échange convectif pour une paroi horizontale, la température d'air - moyenne vis à vis de la zone - étant peu représentative des échanges réels [Khodr Mneimne 90].

Les modèles suivants correspondent à des degrés d'analyse et de précision croissants. Ces options de modèles se retrouvent dans *CODYRUN*, lors du choix du modèle de la convection intérieure. Il appartient ainsi au thermicien de sélectionner le modèle adéquat, vis à vis du problème posé. Une application en est donnée dans le chapitre des exemples d'utilisation, insistant sur le compromis précision temps de calcul, et illustrant l'intérêt de l'application sélective des modèles.

#### 2.3.1.1. Coefficients d'échange constants :

La première démarche possible est celle du choix d'un coefficient d'échange moyen, appliqué à toutes les parois. Cette démarche est assez contestable, surtout au vu de la dispersion observée des valeurs lorsque le type de la paroi est pris en compte. Dans ce dernier cas, les valeurs courantes sont les suivantes :

Paroi verticale	$h_c = 3.7 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
Paroi horizontale (flux ascendant)	$h_c = 5.7 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
Paroi horizontale (flux descendant)	$h_c = 0.5 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$

Issues cette fois de corrélations expérimentales, [Fauconnier 87], d'autres tables existent, différenciant le coefficient d'échange selon la saison, afin de tenir compte d'une plus grande stratification de l'air intérieur pendant l'hiver :

	Eté	Hiver
Paroi verticale	$h_c = 2.5 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$	$h_c = 5.6 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
Plancher	$h_c = 0.5 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$	$h_c = 1.0 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$

Plafond	$h_c = 6 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$	$h_c = 6.6 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$
---------	--	--

### 2.3.1.2. Coefficients d'échange non linéaires :

Issues de l'expérimentation ou d'études en convection sur des plaques planes, des corrélations donnent, pour des parois verticales et horizontales, le coefficient d'échange en fonction de l'écart de température entre la surface et l'air intérieur, considéré comme isotherme. Le plus souvent de la forme  $h_c = a (Ts-Ta)^n + b$ , ces modèles font alors partie des codes détaillés.

Le problème qui survient alors est celui de la multiplicité des corrélations (une par auteur) et surtout de la dispersion des résultats fournis [Allard 87]. Un choix étant effectué, le problème de la non linéarité alors introduite (car l'exposant  $n$  est fractionnaire) peut se résoudre numériquement de plusieurs façons. Il est tout d'abord possible de résoudre le système non linéaire avec les méthodes fournies par l'analyse numérique. Un exemple d'utilisation de ces méthodes est donné dans le chapitre lié au modèle aéraulique. Si le modèle précédent est la seule cause de non linéarité, l'autre voie consiste à résoudre un système linéaire nécessitant une évaluation préalable du coefficient d'échange. Une première possibilité, considérant que les écarts de températures avec le pas de temps précédent sont faibles, est d'utiliser ces dernières dans le calcul du coefficient d'échange. La seconde, pour un même pas de temps, itère successivement jusqu'à convergence des températures de surfaces ou encore du bilan des flux superficiels. C'est cette méthode que nous avons utilisée et son algorithme est exposé au paragraphe 2.6.2.4.3.

### **2.3.2. La convection extérieure :**

Les échanges de chaleur par convection sur les parois externes nécessitent la prise en compte de la dépendance des coefficients d'échange avec la vitesse de l'air. Cette dernière grandeur est un paramètre prédominant dans l'échange de chaleur. Vis à vis de l'analyse dimensionnelle, les corrélations expérimentales sont du type  $Nu = f(Gr, Pr)$ , faisant alors intervenir explicitement les vitesses. Sauf expérimentation (grandeur nature ou similitude et maquette), cette démarche n'est à notre connaissance utilisée que dans un seul code de calcul, par ailleurs dédié à ce problème spécifique, *WIND-CHT* [Melo 89], sur lequel nous reviendrons plus en détail.

#### 2.3.2.1. Les méthodes classiques :

Dans les modèles les plus courants, les flux convectifs s'expriment de nouveau selon la loi de Newton,  $\phi_{cve} = S h_{ce} (Tae - Ts)$  [W]. Pour les mêmes raisons que dans le paragraphe précédent, de nombreuses formulations du coefficient d'échange sont disponibles dans la bibliographie, faisant le plus souvent intervenir la vitesse du vent sur le site et l'exposition au vent de la paroi [Gilles 88]. Le premier paramètre, s'il est peu accessible directement, est disponible en

valeurs moyennées à la station météorologique la plus proche. La reconstitution sur le site de la vitesse du vent utilise des corrélations expérimentales faisant intervenir l'altitude et la rugosité du site. Le caractère dynamique de la vitesse et de la direction du vent (dont témoignent les écarts-types sur la période considérée) limite la précision des modèles, à cause de l'utilisation de valeurs moyennées sur le pas de temps (le plus souvent l'heure).

Le modèle le plus simplifié se retrouvant dans les logiciels de simulation (*CODYBA* [Brau 82] ) considère un coefficient d'échange constant (le plus souvent  $11.7 \text{ W/m}^2\text{.K}$ ) pour toutes les parois extérieures. Cette simplification limite son utilisation à l'étape de l'APS (Avant Projet Sommaire), c'est à dire lorsque la base de connaissance disponible sur le projet est pauvre.

Les autres modèles traduisent la dépendance du coefficient d'échange avec l'exposition au vent au travers de corrélations, telles que celles recommandées par l'ASHRAE. Ce sont celles que nous proposons dans *CODYRUN* :

Paroi sous le vent	$hce = 3.04 (v + 6)^{0.605} \text{ ( W/m}^2\text{.K)}$
Paroi au vent et $v > 2 \text{ m/s}$	$hce = 8 v^{0.605} \text{ ( W/m}^2\text{.K)}$
Paroi au vent et $v < 2 \text{ m/s}$	$hce = 12.24 \text{ ( W/m}^2\text{.K)}$

#### 2.3.2.2. Une nouvelle approche, le modèle de MELO :

Intermédiaire entre les méthodes précédentes (corrélations) et la résolution numérique des équations aux dérivées partielles régissant l'écoulement et le transfert de chaleur, Melo [Melo 89] propose de faire intervenir dans un code de calcul les corrélations donnant le nombre de Nusselt ( $Nu$ ), pour le cas d'un bâtiment rectangulaire, représenté par un parallépipède sur la figure 38. Pour ce type de bâtiment dont l'une des faces est exposée perpendiculairement à la direction du vent, la méthode consiste tout d'abord à déterminer les corrélations de convection forcée (donnant alors  $Nu_f$ ) pour chacune des parois extérieures de l'enveloppe, ce dans le cas de la convection forcée (liée au vent).

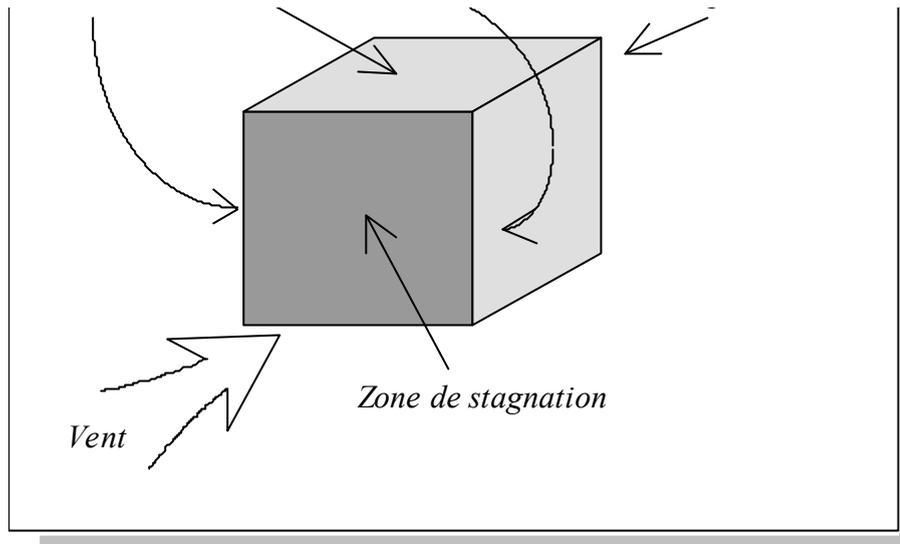


Fig. 38 : Ecoulements d'air au voisinage d'un bâtiment

Pour obtenir les corrélations correspondant à un angle d'incidence du vent quelconque, il s'agit au niveau de chaque paroi, de combiner les corrélations des différents régimes possibles de façon à respecter les conditions aux limites en angle. Ainsi,  $\theta$  désignant l'angle d'incidence du vent par rapport à la paroi hachurée, pour  $\theta = 90^\circ$ , la corrélation à utiliser pour cette paroi est celle du régime de stagnation, donnant par exemple  $Nu_{fs}$ . Pour cette même paroi,  $\theta = 0^\circ$  correspond au régime d'écoulement en couche limite, utilisant alors  $Nu_{fl}$ . La pondération proposée par l'auteur entre les nombres de Nusselt est alors :

$$Nu_f(\theta) = (\cos^2\theta) Nu_{fs} + (1-\cos^2\theta) Nu_{fl}$$

En convection naturelle, des corrélations fournissent le nombre de *Nusselt* lié à l'échange de chaleur,  $Nu_n$ . La méthode proposée utilise alors une loi bibliographique pour la combinaison des effets de la convection naturelle et forcée, à savoir

$$Nu = (Nu_f^3 + Nu_n^3)^{1/3}$$

A l'aide de ce modèle, diverses analyses de sensibilité ont pu être menées, qui montrent en particulier une dépendance importante du coefficient d'échange avec la géométrie du bâtiment. Ainsi, confirmant l'intuition physique, la valeur du coefficient d'échange augmente avec la dimension verticale de la paroi, et diminue avec la dimension horizontale. Il est à noter toutefois que ces considérations pourtant simples ne peuvent que difficilement être déduites des modèles précédents. Ainsi, pour tenir compte de la dimension verticale, il est nécessaire de choisir des corrélations du coefficient d'échange faisant intervenir le vent et la côte de la paroi.

Vis à vis de l'intégration dans un code de calcul, les limitations de ce modèle, en plus de celles liées à la configuration du bâtiment choisi, sont numériques. En effet, le code informatique, *WIND-CHT* [Melo 89], est dédié à la seule détermination des coefficients de transfert convectifs extérieurs, ce pour chaque pas de temps. Il génère à lui seul des temps calcul du même ordre de grandeur que les codes actuels de simulation dynamique des bâtiments sur la même séquence temporelle. Par ailleurs, dans ce même registre, le modèle de Melo demande une description géométrique du bâtiment plus fine, en raison de la présence dans les corrélations évoquées d'éléments caractéristiques des écoulements (longueurs de référence et surfaces).

En dépit de cette limitation que l'on peut espérer voir réduite par la croissance exponentielle de la puissance des micro calculateurs, ce modèle est, selon son auteur, le seul à permettre une précision compatible avec les objectifs des logiciels de simulation modernes. Cependant, vis à vis de notre objectif, compte tenu des contraintes temps calcul et de description, nous avons préféré renoncer à ce modèle.

## 2.4. Le rayonnement

Ce type d'échange de chaleur intervient dès lors que le milieu qui sépare les éléments en interaction est au moins en partie transparent aux ondes électromagnétiques. C'est le cas de l'air, considéré comme transparent au rayonnement thermique. Le cadre de la thermique de l'habitat fait appel à d'autres hypothèses : les surfaces des parois sont considérées comme isothermes, l'émissivité et l'absorptivité d'une surface sont supposées ne pas varier avec la température.

Vis à vis de notre problème, l'objectif de ce chapitre est de permettre la détermination des flux radiatifs à la surface des parois, flux intervenant comme conditions limites du problème de conduction thermique. Les transferts thermiques radiatifs mettant en jeu l'influence simultanée de l'absorption et de l'émission de rayonnement, le concept de flux net est alors introduit pour une surface  $S$ , comme étant la différence entre la puissance de rayonnement émise et celle absorbée.

$$\phi_{net} = S \left[ \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} M_{\lambda}^0 d\lambda - \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda \right]$$

$M_{\lambda}^0$  émittance monochromatique du corps noir [W/m<sup>2</sup>]

L'intégrale sur le spectre total étant d'une part trop complexe (et présentant peu d'intérêt) pour être intégrée à un code de simulation thermique, elle pose de plus le problème de la base de connaissance alors nécessaire (caractéristiques monochromatiques de chacune des surfaces). Dans le domaine de la thermique du bâtiment, les longueurs d'onde des rayonnements qui sont prépondérants peuvent se classer en deux familles :

- Les courtes longueurs d'onde [0.25µm, 2.5µm], avec un maximum voisin de 0.5 µm. Ces radiations correspondent au rayonnement solaire.

- Les grandes longueurs d'onde, ou infrarouge lointain, qui correspondent aux longueurs d'onde d'émission des corps à la température de 20 °C. Le spectre s'étale de 5 µm à 100 µm, avec un maximum à 10µm.

Ce découpage s'accommode au passage fort bien des vitrages, plutôt transparents en deçà de 2.5 µm (c'est à dire pour les courtes longueurs d'onde) et totalement opaques au-delà. Intervient alors une autre hypothèse considérant dans chacun des domaines de longueur d'onde précités, que les surfaces sont assimilées à des corps gris ( $\alpha=\alpha_{\lambda}$ ,  $\epsilon=\epsilon_{\lambda}$ ).

Un second critère de décomposition du problème des flux radiatifs est celui du caractère intérieur ou extérieur. En effet, à l'intérieur d'un bâtiment, les températures de toutes les surfaces concernées sont des inconnues. Lors des échanges avec l'extérieur, seule la température de la surface est inconnue, alors que les températures des autres surfaces participant à l'échange (le ciel et

l'environnement) sont supposées connues. Les méthodes de détermination des flux nous intéressant étant alors différentes dans les deux cas, nous séparerons les échanges intérieurs de ceux intervenant à l'extérieur.

### 2.4.1. Echanges intérieurs de grande longueur d'onde :

#### 2.4.1.1. La méthode des radiosités :

Pour le détail, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie [Allard 86]. Nous n'évoquons ici que le principe de cette méthode. Pour un ensemble de  $n$  surfaces formant enceinte, cette méthode passe tout d'abord par la définition de la radiosité  $J_i$  d'une surface indiquée par  $i$  :

$$J_i = \epsilon_i M_i^0 + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j, \quad F_{ij} \text{ étant le facteur de forme entre les surfaces } i \text{ et } j.$$

La résolution de ce système, permettant de retrouver les flux nets, pose deux difficultés numériques : la nécessité d'un traitement itératif en raison de l'intervention des températures de surfaces (inconnues) dans l'expression de l'émittance propre et l'évaluation des facteurs de forme. De plus, la taille du système alors obtenu incite au choix de modèles simplifiés.

#### 2.4.1.2. La définition de la température radiante moyenne :

C'est la température d'équilibre  $T_{rm}$  qu'aurait un corps noir placé dans l'enceinte et qui échangerait uniquement par rayonnement de grande longueur d'onde avec les parois. L'écriture de l'équilibre radiatif de ce corps noir permet d'écrire :

$$(T_{rm})^4 = \frac{\sum_{i=1}^n J_i F_{ci}}{\sigma_0}, \quad F_{ci} \text{ étant le facteur de forme entre le corps noir et la surface } i$$

et  $\sigma_0$  la constante de Stefan-Boltzmann

Cette température caractérise l'état radiatif de l'enceinte, mais fait toujours intervenir les radiosités. Pour obtenir une formulation simplifiée, les hypothèses simplificatrices suivantes sont alors utilisées :

- Caractériser chaque surface par son émittance propre et non pas par sa radiosité traduit le fait de négliger les inter réflexions de grande longueur d'onde (Corps noir vis à vis du rayonnement de grande longueur d'onde).

- Calculer les facteurs de forme au prorata des surfaces, soit  $F_{ci} = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j}$

### 2.4.1.3. Le modèle simplifié intégré :

La linéarisation des échanges radiatifs, associée aux simplifications du paragraphe précédent, permet de calculer pour une paroi le flux radiatif de grande longueur d'onde ( $\phi_{LWI}$ ) avec les expressions suivantes :

$$T_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i T_{si}}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{et} \quad \phi_{LWI} = h_{r,i} (T_{rm} - T_{si}) S_i$$

Allard signale que la formulation précédente pour la température radiante moyenne génère des erreurs de quelques dixièmes de degrés par rapport à celle issue de la méthode exacte [Allard 82]. Traduite en terme de flux, cette incertitude est cependant en accord avec nos objectifs de précision. Par ailleurs, compte tenu du domaine de variation des températures de paroi dans le cas de la thermique de l'habitat, la valeur de  $h_{r,i}$  le plus souvent utilisée de  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

### **2.4.2. Echanges intérieurs de courte longueur d'onde :**

Cet éclairage est lié au rayonnement solaire transmis par les vitrages auquel s'ajoute la contribution de l'éclairage artificiel du local. Au travers de la définition de l'exittance (l'équivalent pour les courtes longueurs d'onde de la radiosité vis à vis des grandes longueurs d'onde), la méthode dite "exacte" est très similaire à celle des radiosités. Vis à vis de la résolution, la simplification adoptée, considérant chaque surface comme un corps noir vis à vis des grandes longueurs d'onde, n'est plus applicable dans le domaine des courtes longueurs d'onde. En effet, la présence des inter réflexions, que nous supposerons diffuses, nous amène à résoudre un système matriciel dont la taille devient rapidement pénalisante. Il est noter que ce système est à résoudre à chaque pas de temps pour chacune des zones constitutives de bâtiment considéré. Nous avons alors été amenés à considérer une méthode simplifiée.

Les remarques précédentes nous amènent à introduire un artifice de calcul pour diminuer la taille du système à résoudre. Directement inspirée de *CODYBA*, [Brau 82], cette méthode considère l'enveloppe d'une zone quelconque comme étant constituée de quatre entités globales, plancher, paroi d'enveloppe, paroi intérieure et vitrage, que nous indiquerons respectivement de 1 à 4. Cette décomposition préalable, si elle s'applique bien au cas d'un bâtiment monozone, ne permet pas directement de traiter les couplages radiatifs de courte longueur d'onde entre zones. Ces couplages se présentent dans le cas du multizonage, au travers des vitrages et des ouvertures entre deux zones. Pour en tenir compte, il faut introduire deux entités de plus, vitrage interzone, et ouverture interzone, puis gérer de façon algorithmique les couplages. Dans la version actuelle de notre application, nous ne gérons pas ce couplage radiatif de courte longueur d'onde.

Dans chacune des zones, une première hypothèse concerne la répartition du rayonnement incident. Le rayonnement direct est supposé reçu par l'entité plancher, alors que le diffus est réparti au prorata des surfaces de chacune des entités. Avec l'approximation des facteurs de forme au prorata des surfaces ( $S_i$  désignant alors la surface totale), les flux incidents  $\phi^o$  sur chacune des entités s'expriment alors matriciellement, fonction du direct  $\phi_D$  et du diffus  $\phi_d$

$$\begin{Bmatrix} \phi_1^o \\ \phi_2^o \\ \phi_3^o \\ \phi_4^o \end{Bmatrix} = [M] \begin{Bmatrix} \phi_D \\ \phi_d \end{Bmatrix} \text{ avec } [M] = \frac{1}{S_t} \begin{bmatrix} S_t & S_1 \\ 0 & S_2 \\ 0 & S_3 \\ 0 & S_4 \end{bmatrix}$$

Pour tenir compte des réflexions multiples, pour chacune des entités précédentes, on introduit le flux reçu,  $\phi^r$ , résultant du flux incident et des inter réflexions.

$$\phi_i^r = \sum_{j=1}^4 F_{ij} \rho_j (\phi_i^o + \phi_j^r), \text{ pour une entité indicée par } i$$

La résolution du système formé par les quatre équations du type précédent fait appel à l'inversion d'une matrice de dimension réduite (4). Pour déterminer nos inconnues, la dernière étape est celle de la répartition des flux sur les surfaces réelles.

### 2.4.3. Echanges de grande longueur d'onde avec l'extérieur :

Les parois extérieures d'un bâtiment échangent par rayonnement de grande longueur d'onde avec la voûte céleste et l'environnement immédiat. Une façon simple de modéliser ces échanges est de doter fictivement la voûte céleste et l'environnement de températures représentatives de ces phénomènes (respectivement  $T_c$  et  $T_{env}$ ). Le calcul simplifié des facteurs de forme entre une paroi et la voûte céleste, ainsi qu'entre la paroi et l'environnement permet alors l'écriture du flux  $\phi_{LWE}$  émis par la paroi (inclivée de  $s$  degrés par rapport à l'horizontale) :

$$\phi_{LWE} = S \left[ \varepsilon \sigma_0 \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) (T_{se}^4 - T_c^4) + \varepsilon \sigma_0 \left( \frac{1 - \cos s}{2} \right) (T_{se}^4 - T_{env}^4) \right]$$

La première démarche courante est celle de la linéarisation de l'expression précédente. L'expression de  $\phi_{LWE}$  peut en effet se mettre sous la forme suivante :

$$\phi_{LWE} = S (h_{rc} (T_{se} - T_c) + h_{re} (T_{se} - T_{env})), \text{ avec}$$

$$h_{rc} = \varepsilon \sigma_0 \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) (T_c^2 + T_{se}^2) (T_c + T_{se})$$

$$\text{et } h_{re} = \varepsilon \sigma_0 \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) (T_{env}^2 + T_{se}^2) (T_{env} + T_{se})$$

Dans la gamme de températures impliquées, la valeur des coefficients est considérée comme constante et égale à 5 W/m<sup>2</sup>.K. Cette première simplification effectuée, le problème posé de l'évaluation des deux températures précédentes est partiellement résolu en prenant la température de l'environnement égale à celle de l'air extérieur. Par ailleurs, [Melchor 82], la température du ciel est donnée par une relation fonction de l'émissivité du ciel  $\epsilon_c$  et de la température extérieure  $T_{ae}$ , telle que

$$T_c = \epsilon_c^{1/4} T_{ae}$$

De nombreuses corrélations ont été établies pour la détermination de  $\epsilon_c$ , le paramètre déterminant étant toujours l'humidité. En effet, plus l'air est sec et dépourvu de nuages, plus le flux infrarouge net perdu vers l'espace par le sol et les objets sera important. Le tableau suivant, [Abdesselam 86], donne l'écart moyen entre température du ciel et de l'air en saison chaude selon le type de climat :

Climat ...	$(T_{ae} - T_c)$ [K]
... tempéré	16
... tropical humide	8
... tropical sec	30

Le modèle de la température du ciel le plus simplifié est celui la considérant égale à la température de l'air extérieur. Pour mieux prendre en compte ces phénomènes (en raison de l'importance des écarts précédents), nous avons intégré un modèle faisant intervenir l'humidité spécifique  $r_s$ , au travers de la relation de Perrin de Brichambaut [Abdesselam 85]:

$$\log \frac{T_c - T_e}{T_c - T_s} = 0.54 - 0.22 \log \frac{r_s}{r_s'}$$

#### 2.4.4. Echanges de courte longueur d'onde avec l'extérieur :

Le rayonnement extérieur fait l'objet d'une différenciation au niveau de sa distribution spatiale (ou directionnelle). Le rayonnement direct est caractérisé par son unidirectionnalité alors que le rayonnement diffus provient de la voûte céleste et de l'environnement. Ils font l'objet de mesures horaires sur un plan horizontal et sont disponibles dans les fichiers de la Météorologie Nationale. Vis à vis de notre objectif de simulation, il nous est nécessaire de reconstituer les flux sur une paroi d'azimut et d'inclinaison quelconque.

Au départ de ces rappels classiques, la volonté d'ouverture de notre code sur des climats autres que ceux tempérés nous a amené à considérer plusieurs modèles de reconstitution, en particulier au niveau du rayonnement diffus. En effet, de précédentes études menées à l'Université de la Réunion témoignent de l'importance du rayonnement diffus horizontal en climat tropical humide

[Mezino 85]. Pour deux journées extrêmes sur le site de la Réunion, un exemple de tracé est donné à la figure 121 du paragraphe 5.4.2 .

1. De plus, sur un plan non horizontal, à la composante précédente, s'ajoute la réflexion du sol dans le cas des sols clairs. Ainsi, s'il reste essentiel de protéger le bâtiment et particulièrement ses ouvertures contre le rayonnement direct, de telles protections ne peuvent plus être considérées comme suffisantes vis à vis de l'ensemble du rayonnement incident [Cabirol 84]. Dès lors, en plus des outils classiques d'analyse de l'incidence du rayonnement direct (tel que le diagramme solaire), des tracés de l'évolution des flux diffus reçus par les parois et vitrages de l'enveloppe sont à prévoir.

#### 2.4.4.1. Rayonnement direct :

Le calcul du flux énergétique incident sur une paroi quelconque faisant intervenir les relations de trigonométrie solaire classique, nous ne détaillerons pas ces calculs, développés par exemple dans [Gatina 82]. Leur intégration dans un code de simulation thermique appelle cependant quelques remarques :

- Vis à vis des parois opaques extérieures, les caractéristiques radiatives ( $\alpha$ coefficient d'absorption et  $\rho$ de réflexion) sont supposées indépendantes de l'angle d'incidence du rayonnement.

- Le calcul des flux incidents sur les surfaces extérieures doit prendre en compte l'effet des masques proches et lointains, au travers du calcul à chaque pas de temps d'un facteur solaire. Ce calcul peut se faire en utilisant les relations trigonométriques et la géométrie particulière de chacun des masques envisagés, avec cependant l'inconvénient de conduire à des formulations complexes, en particulier dans le cas de plusieurs masques [Robert 80]. Une autre méthode plus performante est celle dite du quadrillage [Cacavelli 88b], qui consiste à mailler en un certain nombre de points l'élément (vitrage le plus souvent) dont la fraction d'insolation est recherchée. L'état d'éclairement (ensoleillé ou ombragé) de chacun de points pouvant être déterminé rapidement, le facteur solaire est approximé par le rapport du nombre de points ensoleillés au nombre total de points du maillage. Vis à vis d'une représentation graphique, l'état d'ensoleillement d'une façade ou d'un vitrage peut alors être obtenu très simplement.

Dans l'état actuel des choses, l'intégration des masques présentant pour nous plus une contrainte de temps de développement qu'une réelle difficulté, nous nous sommes contentés de permettre la saisie d'un profil horaire de fractions d'insolation, ce pour tenir compte de masques éventuels.

- Les vitrages extérieurs, ainsi que les grandes ouvertures, assurent un couplage radiatif rapide entre l'extérieur du bâtiment et les zones internes. Leur prise en compte vis à vis du rayonnement direct se fait au travers de leurs paramètres optiques (coefficient d'absorption, de transmission et de réflexion), lesquels dépendent de l'angle d'incidence.

- Par rapport à des aspects purement algorithmiques, signalons l'accélération des calculs de trigonométrie solaire en considérant la déclinaison  $\delta$  du soleil comme constante sur un nombre de

jours paramétrable (en règle générale 10 jours). De même, en raison du caractère complexe des formulations permettant le calcul des flux incidents, et de la répétition de ces calculs à chaque pas de temps, les traitements sont organisés de façon à ne pas reproduire ces calculs pour des surfaces appartenant aux mêmes plans.

#### 2.4.4.2. Rayonnement diffus :

L'essentiel de cette analyse est inspiré d'une étude du CSTB [Lebru 83] et des publications [Ineichen 88a] et [Ineichen 88b]. Le problème qui nous concerne est celui de la reconstitution du rayonnement diffus sur une paroi quelconque, au départ de la donnée du rayonnement diffus horizontal. La figure 39 rappelle la décomposition du rayonnement incident sur une paroi extérieure :

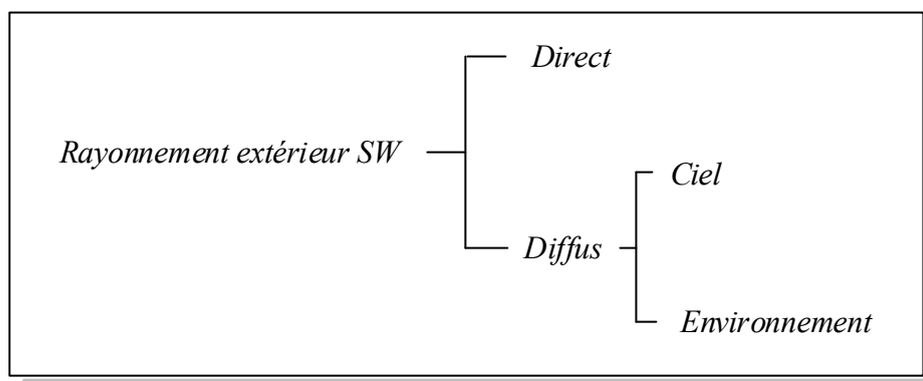


Fig. 39 : Décomposition du rayonnement extérieur

Sur une paroi inclinée, le rayonnement diffus se décompose ainsi en deux parties. L'une provient du ciel et l'autre de l'environnement immédiat du bâtiment, le plus souvent ramené au sol.

##### **2.4.4.2.1. Le rayonnement diffus provenant du sol :**

Cette composante, en raison de l'imprécision de l'évaluation de l'albédo du sol, est le plus souvent considérée comme isotrope. Cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par les mesures et par des études de sensibilité au modèle du rayonnement diffus [Ineichen 87]. Vis à vis de la détermination du flux diffus issu du sol, un choix précis de la valeur de l'albédo doit être effectué, par opposition à la valeur de 0.2 le plus souvent utilisée par défaut dans les codes de calcul [Ineichen 87]. Cet auteur recommande ensuite le choix de valeurs différenciées pour les différentes façades extérieures d'un bâtiment. Ces considérations nous ont amené à renseigner une valeur globale de l'albédo au niveau du bâtiment, avec proposition des valeurs types. Par défaut, cette valeur sera celle prise en compte lors du calcul des flux diffus provenant du sol. Un deuxième niveau de connaissance pourrait se traduire par la possibilité de choix d'une valeur différente de l'albédo au niveau d'une inter ambiance avec l'extérieur.

##### **2.4.4.2.2. Le diffus du ciel :**

La principale source de divergence entre les modèles de reconstitution du diffus est liée au calcul du rayonnement diffus en provenance du ciel.

- Le modèle le plus connu et le plus simple a été publié par Liu et Jordan. Il est basé sur l'hypothèse de la répartition isotrope du flux solaire diffus provenant du ciel. Cependant, les mesures effectuées montrent que par ciel clair, la luminance du ciel est nettement plus forte dans la zone circumsolaire (autour du disque solaire) et dans les zones proches de l'horizon. Ce modèle dit isotrope, s'il fournit des résultats corrects à l'échelle du mois, est inadapté dans le cas d'applications nécessitant un suivi fin des sollicitations solaires.

- Le modèle de Perez part de l'hypothèse que le rayonnement diffus du ciel est formé de trois composantes repérables sur la figure 40 : une composante isotrope (en provenance de la demi-sphère céleste) , une autre circumsolaire (non ponctuelle, caractérisée par un rayon  $\alpha$ ), et une dernière en provenance de l'horizon, d'une hauteur angulaire  $\zeta$ . Ce choix de décomposition prend ainsi en compte les principales causes d'anisotropie du rayonnement solaire, à savoir la diffusion par les aérosols (obéissant à la théorie de Mie), la diffusion multiple de Rayleigh et la rétrodiffusion près de l'horizon.

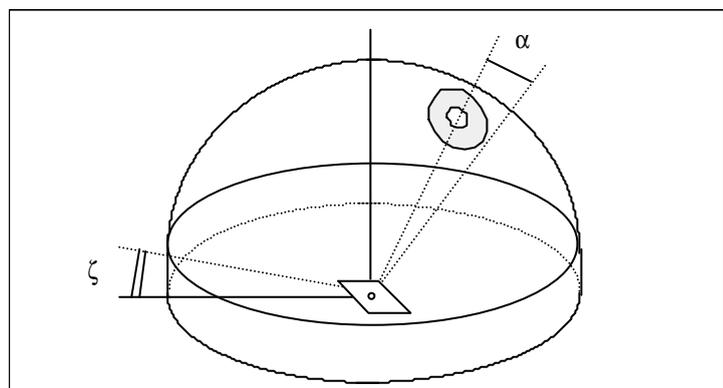


Fig. 40 : Modèle de Perez

Le caractère anisotrope est paramétré par la quantité de diffus horizontal  $d_h$ , et le rapport  $\epsilon$  du rayonnement global horizontal au diffus horizontal. Pour un plan perpendiculaire aux rayons solaires, d'inclinaison  $s$ , le diffus du ciel  $d_i$  est alors :

$$d_i = d_h \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos s) (1 - F_1(d_h, \epsilon, h)) + F_1(d_h, \epsilon, h) \frac{a}{c} + F_2(d_h, \epsilon, h) \sin s \right]$$

où

- $a$  angle solide occupé par la région circumsolaire et vu par le plan incliné
- $c$  angle solide occupé par la région circumsolaire et vu par le plan horizontal
- $h$  hauteur du soleil

- $F_1$  coefficient de luminosité pour la région circumsolaire
- $F_2$  coefficient de luminosité pour la bande horizon

Les valeurs de  $F_1$  et  $F_2$  sont données par intervalle, pour un disque circumsolaire de  $25^\circ$  de rayon ( $\alpha$  du schéma), et établies au départ de mesures faites à Trappes et Carpentras. Dans le modèle original, ces valeurs au nombre de 240, correspondant à différentes luminosités du ciel, sont constituées d'un certain nombre d'intervalles pour chacun des paramètres, à savoir 5 pour la hauteur  $h$  du soleil, 6 pour  $d_h$  et 20 pour  $\varepsilon$ . En raison de sa complexité, une version simplifiée en a été extraite, dénommée alors modèle de Perez [Perez 87].

Considérées comme représentatives sur le site de Genève, les confrontations de ce modèle simplifié avec les mesures en font actuellement le plus précis, présentant en particulier un biais nul. En contrepartie, l'évaluation des angles solides, les valeurs particulières prises par  $F_1$  et  $F_2$ , et la nécessaire reconstitution sur une paroi quelconque en font aussi le modèle le plus coûteux en temps calcul. Toutefois, en l'absence de valeurs publiées de  $F_1$  et  $F_2$  pour d'autres types de climats, nous n'utiliserons pas ce modèle.

- Le modèle de Hay -Willmott, plus ancien que le précédent, s'avère en être une version simplifiée. La composante liée à la bande horizon est ignorée, et celle circumsolaire est assimilée pour le calcul au rayonnement direct. Le coefficient  $F$  de paramétrage de l'isotropie fait intervenir le taux de transmission de l'atmosphère. Pour une paroi d'inclinaison  $s$  et d'azimut  $\gamma$ , le diffus du ciel est :

$$d(s, \gamma) = (F C(s) \frac{1 + \cos s}{2} + (1 - F) \frac{\text{Max}(\cos i, 0)}{\sin h}) d_h$$

avec  $C(s) = 1.00115 - 3.54 \cdot 10^{-2} s - 2.46 \cdot 10^{-6} s^2$

$$F = 1 - \frac{G_h}{G_{hExt}} \left(1 - \frac{d_h}{G_h}\right)$$

et  $i$  angle d'incidence moyen des rayons du soleil avec la normale à la surface

$h$  la hauteur du soleil

$G_h$  éclairement global mesuré sur le site et  $G_{hExt}$  éclairement global extra terrestre

Ce modèle est tout d'abord d'une complexité intermédiaire entre le modèle isotrope et celui de Perez. Si on exclut ce dernier (pour les raisons exposées précédemment), la comparaison des résultats fournis place le modèle de Hay-Willmott comme le plus intéressant pour la reconstitution du diffus du ciel au départ du diffus horizontal.

Pour permettre de mener des études de sensibilité au modèle de reconstitution du diffus, nous choisissons d'intégrer ce dernier modèle, ainsi que le modèle isotrope. Une exploitation en sera donnée au chapitre V.

## 2.5. Les transferts d'humidité

Dans un bâtiment, les échanges d'humidité dans un local interviennent lors des transferts aérauliques et font intervenir les occupants, les systèmes de traitement d'air, les parois poreuses et le mobilier. Si les trois premiers niveaux sont habituellement intégrés dans les modèles de ces transferts, beaucoup plus rares sont les outils permettant de prendre en compte les phénomènes complexes que sont la diffusion de vapeur dans les parois et les échanges avec le mobilier [Kohonen 89], [El Diasty 93]. Cependant, le besoin est réel, témoin en est par exemple le fait que certains risques tels que la condensation sur les parois ne peuvent être au mieux qu'évalués à l'aide de règles simplistes. Dans des cas sortant du domaine d'application de ces règles, le résultat n'est que le fruit (pas toujours heureux !) de l'expérience des concepteurs. Par ailleurs, en plus des aspects énergétiques (dégradation des propriétés thermiques) ou de confort, la diffusion de vapeur d'eau dans les structures pose le problème de la durabilité de la construction, en raison des risques mécaniques encourus (corrosion des parties métalliques dans les structures en béton ou encore putréfaction du bois).

La difficulté de modéliser ces transferts est principalement analytique et provient du couplage entre les champs de température et d'humidité. La loi de la diffusion (loi de Fick) appliquée à une paroi fait ainsi intervenir deux équations couplées, l'une de diffusion de la chaleur, l'autre de diffusion de vapeur d'eau, avec les conditions aux limites correspondantes.

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Omega \rho_s l_v \frac{\partial u}{\partial t} \\ \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \pi}{\partial x} \frac{\partial P_v}{\partial x} + \pi \frac{\partial^2 P_v}{\partial x^2} \end{cases}$$

avec

$c$	chaleur massique du matériau	[J/kg.K]
$\rho$	masse volumique du matériau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	masse volumique de la vapeur d'eau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	masse volumique sèche du matériau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Omega$	taux de changement de phase	
$l_v$	enthalpie massique de vaporisation	[J/kg <sub>eau</sub> ]
$\pi$	perméabilité du matériau à la vapeur d'eau	[kg <sub>eau</sub> /m.s.Pa]
$u$	teneur en eau du matériau	[kg <sub>eau</sub> /kg <sub>matériau</sub> ]
$P_v$	pression partielle de vapeur d'eau	[Pa]

En plus de leur complexité, les équations précédentes font apparaître une contrainte majeure, la nécessité de connaître les caractéristiques thermohygriques des matériaux constituant de la paroi.

Certaines observations issues de l'utilisation des modèles détaillés (incluant les échanges avec le mobilier et les parois) montrent le rôle régulateur du mobilier vis à vis de l'humidité relative. Par ailleurs, la prise en compte des échanges d'humidité dans les parois ne modifiant pas substantiellement le régime des températures, elle limite par contre les excès d'humidité relative en climat chaud et humide. Vis à vis d'un critère de confort, les modèles ne tenant ainsi pas compte de ces échanges fournissent alors des réponses quelque peu pessimistes. En présence de débits interzones, il est admis que la diffusion de vapeur au travers des parois est d'une importance négligeable par rapport au phénomène de transport. Vis à vis de notre objectif qui est d'apporter des réponses par rapport au confort thermique et énergétique, nous n'intégrerons pas ces phénomènes.

### 2.5.1. Le bilan enthalpique :

En négligeant les transferts de masse avec les parois et en considérant l'humidité spécifique et la température constantes dans chaque zone thermique, le bilan d'humidité se ramène au bilan enthalpique. L'enthalpie d'une zone indiquée par  $i$  est déterminée par l'expression suivante :

$$H(i) = m_{as}(i) (C_{as} T_{ai}(i) + l_v r_s(i) + C_v T_{ai}(i) r_s(i) )$$

Si les parois indicées par  $j$  sont au nombre de  $N_p(i)$ , la variation d'enthalpie par unité de temps s'écrit alors, en supposant les échanges convectifs intérieurs linéarisés :

$$\frac{dH(i)}{dt} = \dot{H}_{ent} - \dot{H}_{sor} + \sum_{j=1}^{N_p(i)} h_c S_j [T_{si}(j) - T_{ai}(i)] + P_{lat} + P_{sens} + CI_{lat} + CI_{sens}$$

$$\dot{H}_{ent} = \sum_{n=1}^{N+1} \dot{Q}_{as}(n, i) [T_a(n) C_{as} + r_s(n) [l_v + C_v T_{ai}(n) ] ]$$

$$\dot{H}_{sor} = [T_{ai}(i) C_{as} + r_s(i) [l_v + C_v T_{ai}(i) ] ] \sum_{n=1}^{N+1} \dot{Q}_{as}(i, n)$$

avec :

$\dot{H}_{ent}$  enthalpie de l'air humide pénétrant dans la zone  $i$  par unité de temps [W]

$\dot{H}_{sor}$  enthalpie de l'air humide sortant de la zone  $i$  par unité de temps [W]

$\dot{Q}_{as}(n, i)$  débit massique d'air passant de la zone  $n$  vers la zone  $i$  [kg/s]

$N$  nombre total de zones, la zone  $(N+1)$  désignant l'extérieur

L'évolution dans le temps de l'enthalpie de chacune des zones fait apparaître un couplage entre température et humidité, au travers du dernier terme de l'équation de définition de l'enthalpie. Ainsi, la résolution directe doit faire appel à un schéma itératif. Cependant, le terme couplant les inconnues de notre problème, à savoir température et humidité de la masse d'air, est numériquement négligeable

devant les autres termes [Caccavelli 88a]. En supposant l'absence de changement de phase de l'eau, le bilan enthalpique peut alors se faire en découplant les échanges sensibles et latents. Vis à vis des traitements, cette démarche permet d'enchaîner séquentiellement le système correspondant à la détermination des températures (système thermique) à celui calculant les humidités spécifiques de chaque zone, selon le schéma de la figure 41 :

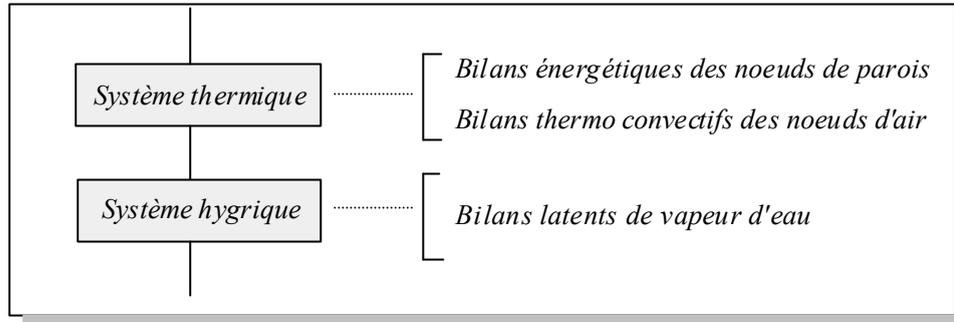


Fig. 41 : Le modèle hygro thermique

### 2.5.2. Le bilan sensible :

Pour une zone indiquée par  $i$ , avec les notations précédentes, l'enthalpie sensible s'écrit :

$$H_{sens}(i) = m_{as} C_{as} T_{ai}(i)$$

En considérant indépendantes du temps la masse volumique et la chaleur massique de l'air sec, la variation dans le temps de l'enthalpie sensible égale la somme des flux d'échanges convectifs avec les parois, de la variation d'enthalpie liée aux échanges aérauliques et des termes de production interne.

$$\begin{aligned} \frac{dH_{sens}(i)}{dt} &= \rho_{as} C_{as} V(i) \frac{dT_{ai}(i)}{dt} \\ &= \sum_{j=1}^{N_p} h_c [T_{si}(j) - T_{ai}(i)] + P_{sens} + CI_{sens} + \sum_{n=1}^{N+1} \dot{Q}_{as}(i, n) C_{as} [T_{ai}(n) - T_{ai}(i)] \end{aligned}$$

Cette équation, dite de bilan sensible ou thermo convectif de l'air, fait partie intégrante du système thermique. Ce dernier, conformément à la figure 41, est alors composé des bilans énergétiques de chacun des noeuds de paroi et des bilans thermo convectifs de l'air de chacune des zones.

### 2.5.3. Le bilan latent :

L'équation de bilan latent traite alors des transferts massiques de vapeur d'eau dans le local. L'enthalpie de vapeur d'eau, ou enthalpie latente, s'écrit dans ce cas :

$$H_{lat}(i) = m_{as} r_s(i) l_v = m_v(i) l_v$$

avec  $m_v(i)$  masse d'air humide de la zone  $i$  [kg]

L'évolution temporelle de l'enthalpie de la vapeur d'eau permet de retrouver celle de l'humidité spécifique. Les termes faisant intervenir les débits massiques expriment le couplage hydrique entre les zones. En raison du découplage de l'aéroulque et du champ thermique, ces débits, qui font l'objet du chapitre III consacré aux transferts aéroulques, sont issus d'un calcul précédent et sont donc des entrées du modèle hydrique.

$$\frac{dH_{lat}(i)}{dt} = m_{as} l_v \frac{dr_s(i)}{dt} = \left( \sum_{n=1}^{N+1} \dot{Q}_{as}(i,n) l_v [r_s(n) - r_s(i)] \right) + P_{lat} + CI_{lat}$$

Le système hydrique est alors constitué des équations de bilan latent de chacune des zones (voir figure 41). En regroupant sous la forme d'un vecteur  $R$  les humidités spécifiques de chacune des zones, ce système peut s'écrire sous la forme matricielle d'état  $C_h \dot{R} = A_h R + B_h$ . De la même manière que pour le système thermique,  $A_h$  et  $B_h$  seront décomposés en plusieurs matrices et vecteurs facilitant leur établissement à chaque pas de temps. Le système linéaire ainsi formé est résolu par la méthode des différences finies. Des détails sur l'organisation de ce module sont donnés au chapitre consacré à l'architecture informatique de l'application.

Remarquons pour terminer que la quantité d'humidité présente dans un volume d'air s'exprime par l'humidité spécifique (la variable de notre module de calcul) ou encore l'humidité relative. C'est sous cette dernière forme que l'humidité est le plus souvent décrite dans les fichiers météorologiques, les fichiers résultats ou encore au niveau des consignes des systèmes de climatisation latente. Nous avons indiqué en Annexe B les formules que nous avons utilisées, liées à l'air humide.

## 2.6. L'assemblage et la résolution du problème thermique

### 2.6.1. L'assemblage :

En raison du découplage du problème thermique des aspects aérauliques et hydriques, le problème que nous considérons de manière isolée est celui dans lequel les inconnues des équations sont toutes des températures. Le système ainsi constitué est composé des équations

- de bilan thermique des noeuds de parois et vitrages constitutifs de l'enveloppe.
- de bilan thermo convectif de l'air de chacune des zones
- d'équilibre radiatif du noeud de température radiante moyenne de chacune des zones.

#### 2.6.1.1. Les noeuds conductifs de paroi :

Les noeuds internes à la paroi (ou noeuds volumiques) ne sont concernés que par la conduction. Compte tenu de l'hypothèse de la conduction monodimensionnelle, l'écart des deux flux conductifs de la figure suivante motive la variation de température. Nous avons représenté sur la partie droite de la figure 42 le modèle électrique associé :

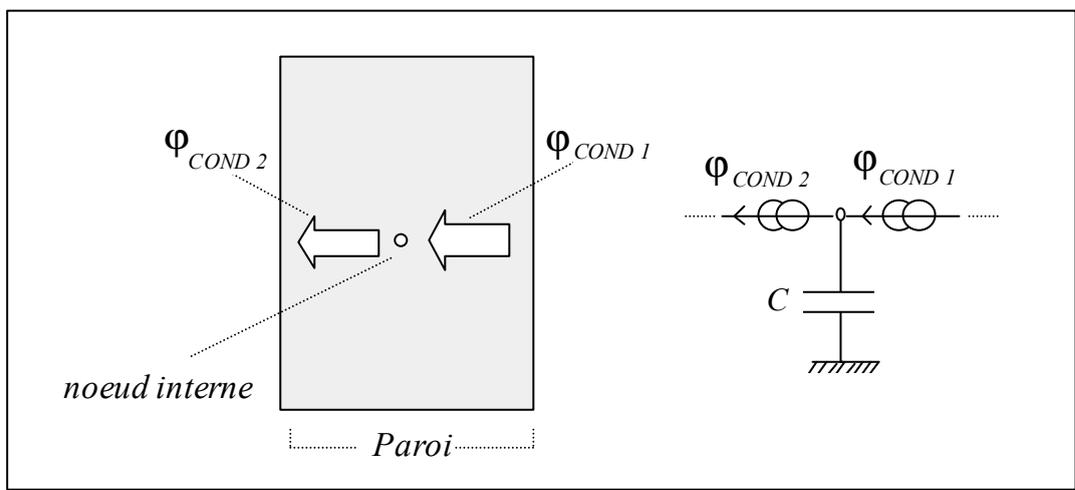


Fig. 42 : Bilan thermique d'un noeud interne et schéma électrique associé

Si en régime permanent la somme de ces flux est nulle, en régime dynamique la somme des flux motive la variation de la température du noeud interne, selon l'équation d'équilibre :

$$C \frac{dT}{dt} = \Phi_{COND 1} - \Phi_{COND 2}$$

Vis à vis de l'assemblage, les noeuds de paroi qui nous intéressent principalement sont les noeuds surfaciques, pour lesquels l'équation de bilan associée fait intervenir les flux convectifs et radiatifs illustrés sur la figure suivante :

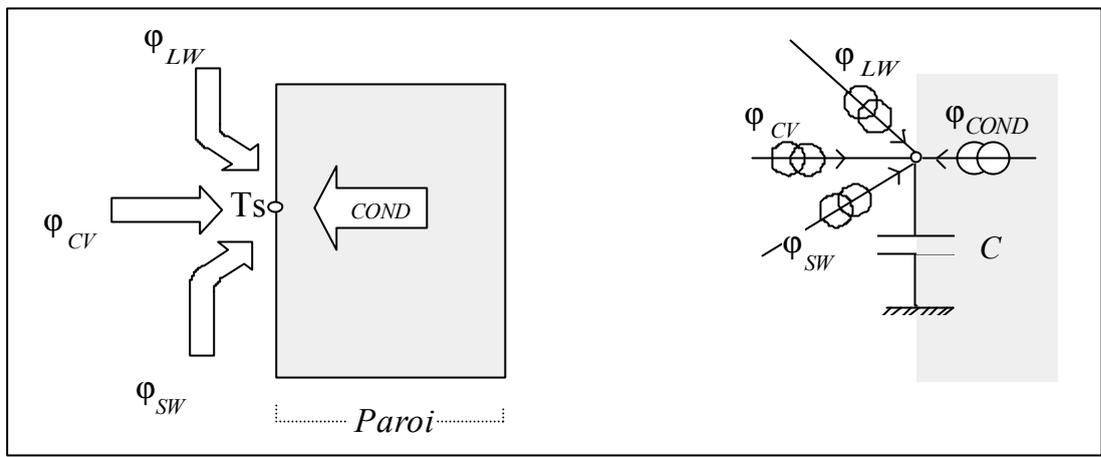


Fig. 43 : Bilan thermique d'un noeud surfacique et schéma électrique associé

En régime dynamique, pour avoir le même type d'équations pour tous les types de noeuds, une forme générale est

$$C \frac{dT}{dt} = \Phi_{COND} + \Phi_{CV} + \Phi_{SW} + \Phi_{LW}$$

La capacité  $C$  est nulle s'il s'agit d'un noeud de vitrage ou d'un noeud de surface de paroi, à condition que le modèle conductif associé à cette paroi ne dispose pas de capacité surfacique. Pour un noeud se situant dans le volume de la paroi (noeud interne), la capacité est non nulle et les flux autres que conductifs sont nuls.

#### 2.6.1.2. Le bilan thermo-convectif du noeud d'air :

Pour une zone thermique du bâtiment, le volume d'air que nous supposons isotherme échange de la chaleur par convection avec les parois intérieures.

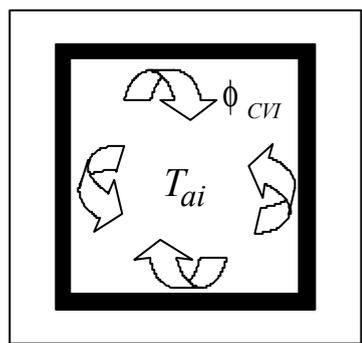


Fig. 44 : Schéma d'équilibre thermo convectif du noeud d'air.

Pour un bâtiment, ces équations, dont le nombre égale le nombre de zones thermiques, traduisent l'équilibre décrit sur le schéma précédent. En présence de débits aérauliques entre les zones, le découplage évoqué nous amène à considérer à ce niveau ces débits comme connus. Ces derniers interviennent dans l'équation d'équilibre qui s'écrit alors :

$$C_{a_n} \frac{dT_{ai}(n)}{dt} = \sum_{j=1}^{N_p(i)} \phi_{CVI_j} + \sum_{i=1}^{N+1} C_{as} \dot{Q}(n,i)(T_{ai}(i) - T_{ai}(n))$$

avec  $N_p(i)$  nombre total de parois intérieures à la zone  $n$   
 $N$  nombre total de zones,  $(N+1)$  désignant l'extérieur

### 2.6.1.3. Le bilan radiatif du noeud de température moyenne :

L'équation d'équilibre du noeud de température radiante moyenne traduit l'équilibre d'une sphère de métal peinte en noir n'échangeant avec les parois que par rayonnement de grande longueur d'onde.

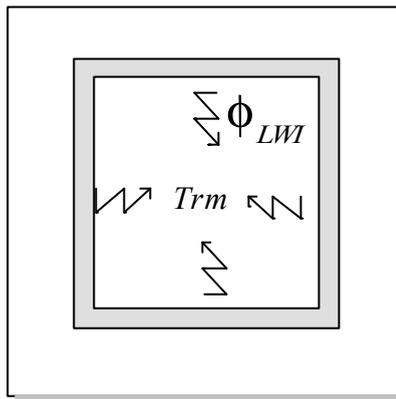


Fig. 45 : Schéma d'équilibre radiatif du noeud de température moyenne.

Avec certaines simplifications concernant le calcul des facteurs de forme et l'hypothèse de linéarisation des flux radiatifs intérieurs de grande longueur d'onde, l'équation d'équilibre liée à la figure 45 s'écrit simplement dans une zone :

$$\sum_{j=1}^{N_p(i)} h_{rj} (T_{si}(j) - T_{rm}) = 0$$

### 2.6.1.4. Le système thermique général :

Pour un bâtiment donné, l'évolution thermique du bâtiment est régie par le système formé par l'ensemble des équations précédentes, à savoir :

$$\left\{ \begin{array}{l}
C \frac{dT}{dt} = \Phi_{COND} + \Phi_{CV} + \Phi_{SW} + \Phi_{LW} \\
\dots \\
0 = \sum_{j=1}^{Np_i} h_{ri} (Tsi(j) - Trm) \\
\dots \\
Ca_n \frac{dT_{ai(n)}}{dt} = \sum_{j=1}^{Np(i)} \phi_{CVIj} + \sum_{i=1}^{N+1} C_{as} \dot{Q}(n,i)(T_{ai(i)} - T_{ai(n)}) \\
\dots
\end{array} \right.$$

La résolution simultanée des équations précédentes traduit en particulier le couplage thermique des zones entre elles. Ce système dit couplé peut s'écrire en utilisant le formalisme matriciel d'état, sous la forme  $C \dot{T} = A T + B U$ ,  $T$  étant alors le vecteur d'état du système bâtiment. Ce vecteur est alors constitué de toutes les températures des noeuds de discrétisation des parois, des températures sèches et radiantes moyennes de chacune des zones.

$$\{T\} = (T_1, T_2, \dots, T_n, Trm_1, Trm_2, \dots, Tai_1, Tai_2, \dots)$$

Signalons au passage que le vecteur  $T$  n'est pas à proprement parler un vecteur d'état dans la mesure où les températures radiantes moyennes s'expriment, en raison des simplifications adoptées, comme combinaisons linéaires des températures de surfaces intérieures. Toutefois, vis à vis de notre processus de couplage des zones entre elles, l'introduction de cette composante se justifie par des considérations liées au calcul, sur lesquelles nous reviendrons au paragraphe 2.6.2.3

### 2.6.2. La résolution :

L'utilisation d'une discrétisation temporelle selon un schéma aux différences finies ramène la résolution du système algèbro-différentiel à celle d'un système linéaire dont la dimension égale le nombre de composantes du vecteur d'état. Fonction de la méthode numérique retenue, le temps calcul nécessaire est alors une fonction de  $n^2$  ou  $n^3$ , si  $n$  désigne la dimension. Cette contrainte de calcul est particulièrement pénalisante : En effet, sans intégration des transferts aérauliques, la simulation d'un bâtiment multizone conduit rapidement à un système couplé de taille importante. Vis à vis de notre objectif, un aspect restreint par ailleurs l'intérêt de la résolution directe de ce système couplé : nous désirons pouvoir choisir des modèles des transferts de chaleur qui soient différents en particulier d'une zone à l'autre (par exemple la convection intérieure). Dans le cas de l'intégration d'un

phénomène de façon non linéaire pour l'une des zones, la résolution conduit à un schéma itératif, répétant autant de fois que nécessaire la résolution du système complet, et pénalisant ainsi le temps calcul. Résoudre directement le modèle global du bâtiment ne convient donc pas à notre approche.

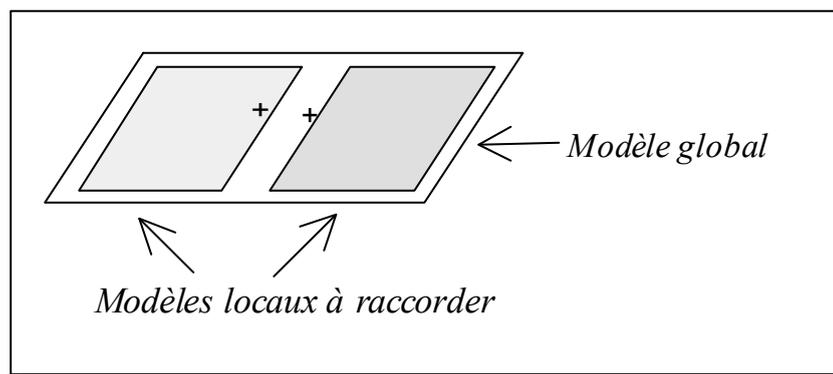
Le bâtiment, de par sa structure géométrique et les phénomènes physiques dont il est le siège, est complexe. L'analyse systémique, menée au chapitre I, nous a incité à décomposer cet objet en sous-systèmes élémentaires, les zones. Cette décomposition ne présente d'intérêt que si elle répond aux deux critères suivants :

- nous sommes capables de proposer des modèles élémentaires, pour ces composants de base considérés isolément.
- ce préalable étant assuré, au sein de l'objet physique de départ, ces constituants interagissent entre eux. Au départ de leurs modèles élémentaires, il est alors nécessaire de construire un modèle appréhendant la globalité de l'objet initial à étudier. Le problème du couplage physique des constituants, c'est à dire du raccordement des modèles mathématiques les représentant, apparaît alors.

#### 2.6.2.1. Les différentes méthodes de couplage :

Une typologie des méthodes de raccordement de modèles par paires (entre des éléments pour lesquels on dispose de modèles locaux) est proposée par [Blanc Sommereux 91].

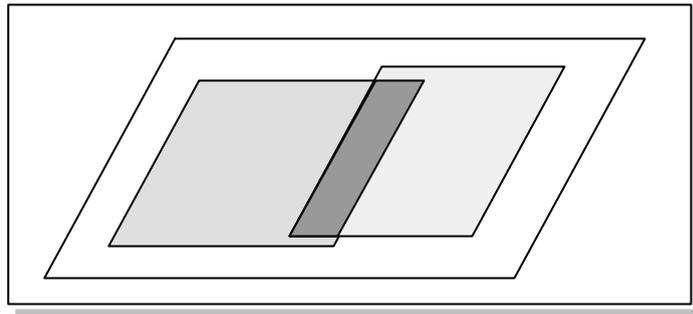
- Contact bord à bord :



*Fig. 46 : Couplage par contact*

Dans ce cas, le principe à retenir est de raccorder une frontière naturelle (frontière sur laquelle s'expriment les conditions limites) de l'un des modèles avec une frontière naturelle de l'autre modèle. Dans le cas d'une paroi bicouche, c'est ce type de raccordement que nous utilisons pour constituer le modèle global de paroi au départ de celui des deux couches.

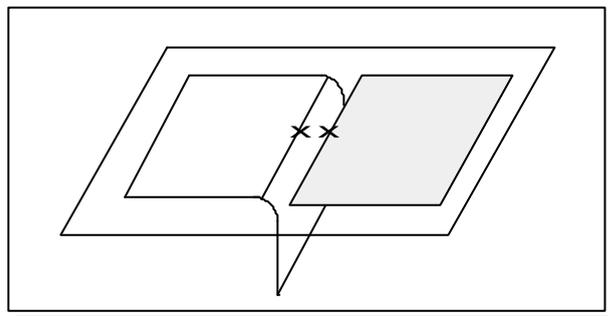
- Recouvrement :



*Fig. 47 : Couplage par recouvrement*

La particularité de ce mode de couplage est la présence d'une partie commune à chacun des modèles élémentaires. La partie commune, dite zone de recouvrement, décrite dans chacun des modèles, permet alors de coupler simplement des modèles entre eux (à condition bien sûr d'être sécants sur la même frontière), même si cette double description paraît a priori superflue. Un exemple de recouvrement peut être donné en interpénétrant deux parois à deux couches pour former une seule paroi à trois couches.

- Pliage : Dans ce dernier cas, il y a suppression (ou pliage) d'une partie de l'un des modèles à coupler. Ce mode de couplage peut se combiner avec les précédents pour donner des raccords mixtes, tel le contact sur pli dont nous donnons la représentation.

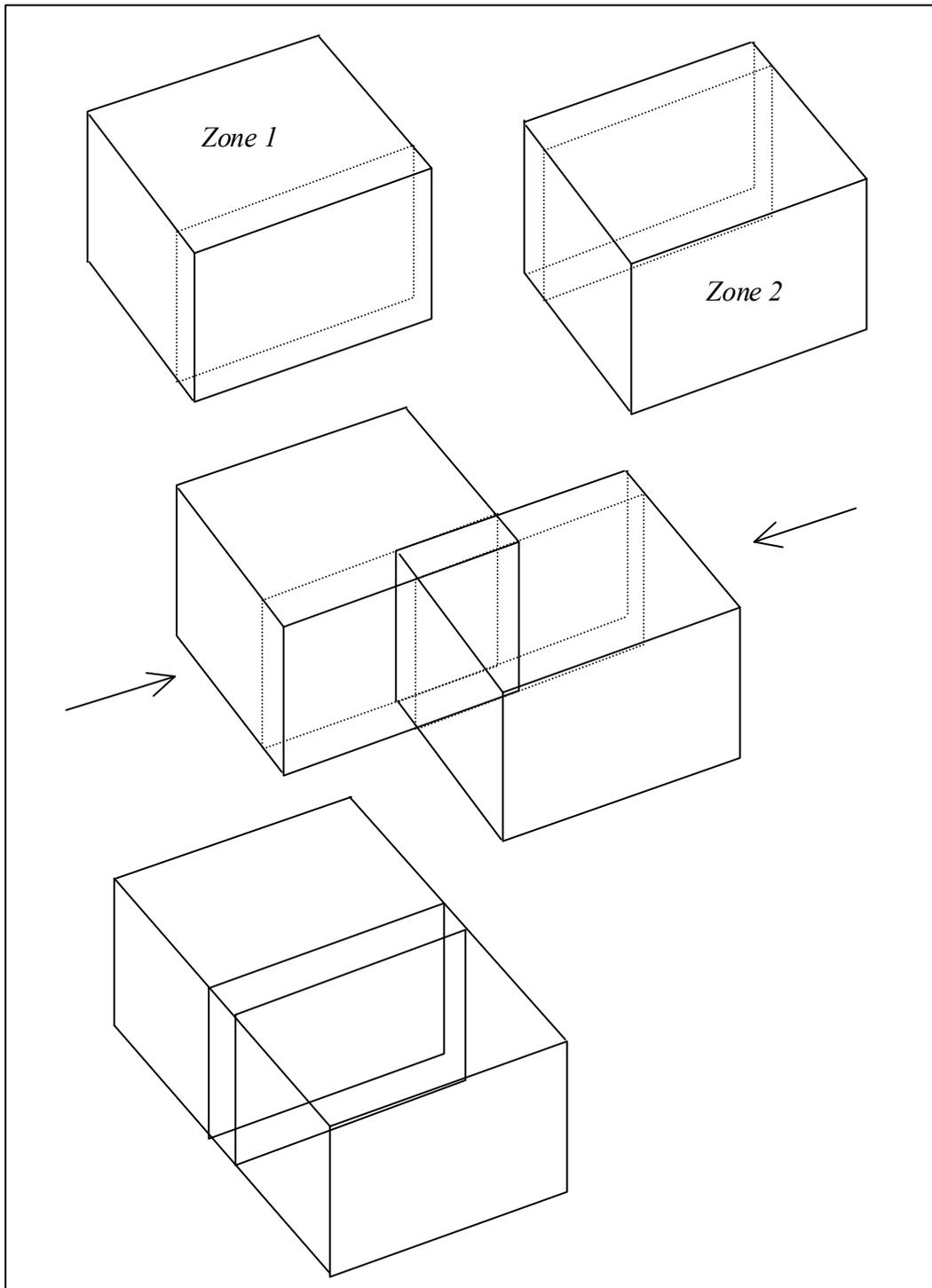


*Fig. 48 : Couplage par contact sur pli*

Revenant au problème initial du couplage thermique entre les zones d'un bâtiment, la méthode de raccordement choisie est celle du raccordement avec recouvrement. La partie de recouvrement constituera une entité que nous appellerons *inter ambiance*. Pour deux zones adjacentes, chacun des modèles de zones intègre les murs et vitrages assurant le couplage thermique.

#### 2.6.2.2. Choix du recouvrement pour le couplage des zones :

Dans le cas d'un bizona, le raccordement avec recouvrement des deux modèles de zone est explicité par le schéma suivant :



*Fig. 49 : Constitution d'un modèle bizone au départ des deux modèles de zone.*

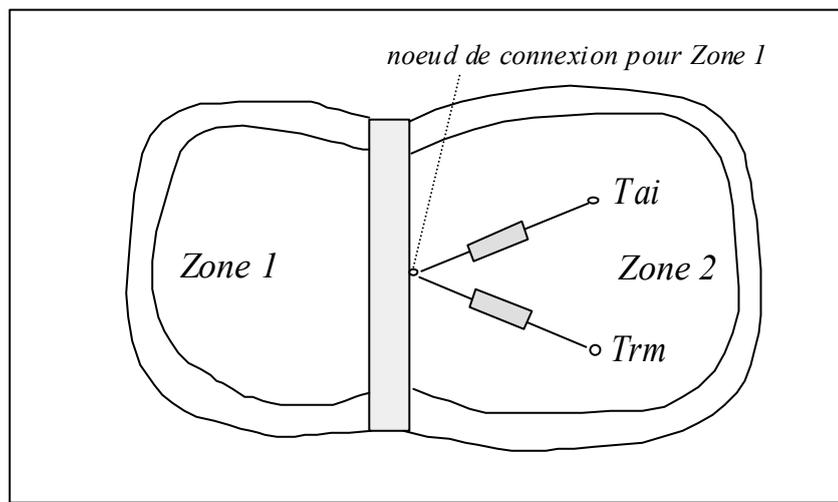
La démarche adoptée vise à établir pour chacune des zones un modèle local, dit modèle de zone. Compte tenu du mode de couplage choisi, un modèle local de zone est constitué des équations suivantes :

- de bilan thermique des noeuds de paroi internes à la zone

- de bilan thermo convectif de l'air la zone considérée
- de bilan radiatif du noeud de température radiante moyenne
- de bilan thermique des noeuds de paroi et de vitrage séparant la zone de l'extérieur
- de bilan thermique des noeuds de paroi et de vitrages séparant la zone considérée des zones adjacentes. Ces noeuds constituent le maillage de la zone de recouvrement.

### 2.6.2.3. Le choix d'une méthode de résolution, la connexion :

Le couplage thermique entre les zones étant une réalité physique, la connexion est une méthode numérique de résolution pour résoudre les équations associées. Le modèle local d'une zone est un système de taille réduite par rapport à celle du système complet. Pour ce modèle réduit, il est alors nécessaire de comprendre la manière dont s'exprime le couplage. Considérons pour cela deux zones séparées par une paroi (Figure 50). Dans le système d'équations du modèle de la zone *zone 1*, le noeud de discrétisation surfacique en contact avec l'air de la seconde zone va jouer un rôle particulier. En effet, l'équation de bilan qui lui est associée fait apparaître des termes de couplage, au travers des températures sèche et radiante moyenne de la zone *zone 2*. Nous qualifions alors ce type de noeud de "noeud de connexion".



*Fig. 50 : Schéma de couplage thermique entre les zones*

Pour une zone donnée, la résolution est faite tout d'abord en supposant connues les températures (sèches et radiantes moyennes) des zones adjacentes, puis en assurant la convergence de l'ensemble des températures de zones à l'aide d'un schéma itératif illustré par la figure suivante. Pour simplifier notre vocabulaire, la résolution d'une zone désignera dès lors la résolution de l'équation matricielle d'évolution de la zone considérée.

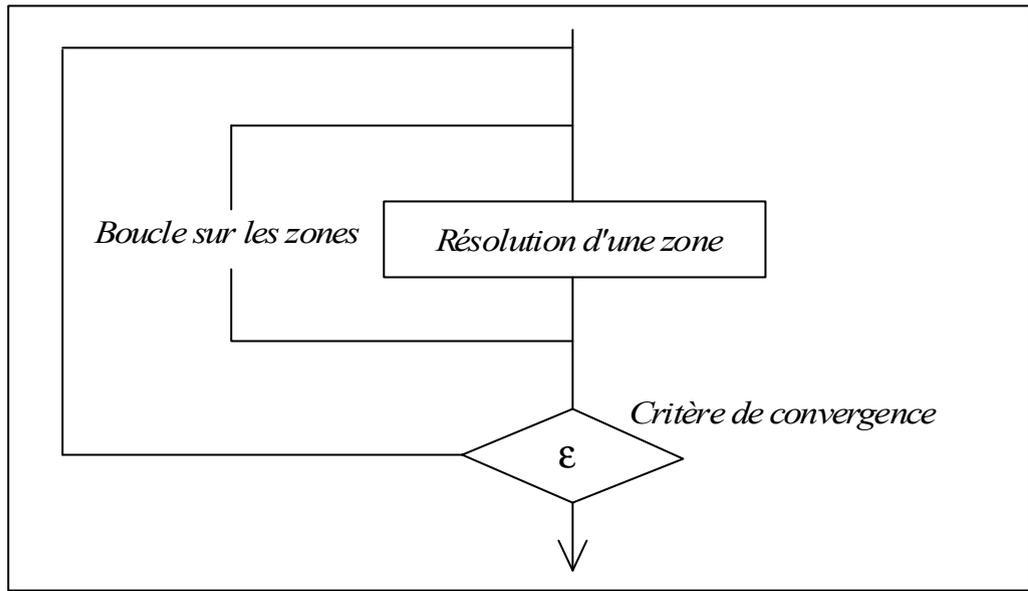


Fig. 51 : Schéma de couplage thermique entre les zones

Pour un pas de temps donné, la procédure itérative précédente est initialisée en considérant pour les zones adjacentes les températures du pas de temps précédent. Cette initialisation table sur une évolution lente des températures, ce qui est généralement le cas dans le bâtiment. La résolution de chaque zone fournit ensuite de nouvelles valeurs des températures, lesquelles seront utilisées par les boucles suivantes en cas de défaut de convergence. Cette méthode, dite de connexion, se justifie d'autant plus que le couplage entre les zones est faible, cas dans lequel le nombre d'itérations nécessaire à la convergence est faible. A ce moment, une économie importante de temps de calcul est prévisible par rapport à la résolution directe du système global.

Le critère de convergence doit tenir compte de l'inertie plus importante pour les parois (le plus souvent lourdes) que pour les volumes d'air de chaque zone. Un critère de convergence sur les seules températures sèches d'air est à proscrire, la température de l'air pouvant se stabiliser bien avant que les parois n'aient fini d'évoluer thermiquement. Ce critère doit donc faire intervenir les températures de parois, par exemple sous la forme de la minimisation d'une distance entre deux itérations. Un autre type de test d'arrêt est employé, qui s'assure de l'exactitude des bilans thermiques entre deux itérations. En effet, si le bilan en un point de discrétisation est non nul (ou inférieur à une puissance infinitésimale), sa température continuera d'évoluer au cours des itérations suivantes. Si ce dernier test est le plus précis, c'est aussi le plus coûteux en temps calcul.

#### 2.6.2.4. Le choix d'une méthode numérique pour une zone :

Le problème élémentaire à résoudre est celui de la résolution de l'équation d'évolution d'état de la zone considérée, équation de la forme  $C \dot{T} = A T + B U$ . En excluant dans un premier temps le

cas des modèles introduisant des non linéarités, les méthodes utilisées sont celles de différences finies.

#### 2.6.2.4.1. La méthode directe :

Pour chacune des équations constituant le modèle de zone, cette méthode conduit à l'expression suivante :

$$C \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \Theta (A T(t + \Delta t) + B U(t + \Delta t)) + (1 - \Theta) (A T(t) + B U(t))$$

$\Theta$  = paramètre lié au schéma

La discrétisation de la variable temps, associée à un schéma de résolution implicite (paramètre  $\Theta = 1$ ) pour prévenir les risques d'oscillation (en raison de la différence d'inertie existant entre les parois et l'air de la zone, ainsi qu'entre certaines parois), est la méthode que nous avons implémentée.

Compte tenu de la valeur de  $\Theta$ , les températures du pas de temps précédent étant à chaque fois connues, l'équation précédente se ramène à la résolution d'un système linéaire, à savoir :

$$\left[ \frac{C}{\Delta t} - A \right] \{T(t + \Delta t)\} = \left[ \frac{C}{\Delta t} \right] \{T(t)\} + B \{U(t + \Delta t)\}$$

#### 2.6.2.4.2. La synthèse modale :

Appliquée à notre cas, cette méthode consiste à utiliser avant la discrétisation temporelle la réduction modale pour disposer de modèles réduits pour chacune des zones. Ces modèles réduits, de dimension typiquement 4 ou 5, décrivent cependant avec précision le comportement thermique de la zone. Ensuite, la synthèse modale [Blanc Sommereux 91] permet ensuite, au départ de ces modèles élémentaires réduits, de construire un modèle du bâtiment très performant au niveau du temps calcul. Cette méthode est fort efficace vis à vis du temps calcul dans le cas de l'invariance de la matrice  $A$ . Cependant, notre modèle thermo-aéraulique calculant à chaque pas de temps les débits, il nous est alors nécessaire de reconduire la recherche des valeurs propres à chaque pas de temps. En conséquence, il est préférable de retenir la méthode de résolution par différences finies.

#### 2.6.2.4.3. Le traitement des non linéarités :

Notre volonté d'intégrer plusieurs modèles d'un même phénomène nous a conduit à nous intéresser aux modèles convectifs intérieurs non linéaires. Se référant au paragraphe 2.3.1.2, l'expression du coefficient d'échange fait alors intervenir l'écart de température entre la surface et

l'air, sous la forme  $h_{ci} = a ( Ts - Tai ) ^ n + b$ . Pour la zone dans laquelle un tel modèle est sélectionné, le système d'équations à résoudre se présente alors sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dT_{S(1)}}{dt} = (a (Tai - T_{S(1)})^n + b) (Tai - T_{S(1)}) + \Phi_{COND} + \Phi_{SW} + \Phi_{LW} \\ C_2 \frac{dT_{S(2)}}{dt} = (a (Tai - T_{S(2)})^n + b) (Tai - T_{S(2)}) + \Phi_{COND} + \Phi_{SW} + \Phi_{LW} \\ \dots \\ C_a \frac{dT_{ai}}{dt} = \sum_{j=1}^{N_{pi}} (a (Tai - T_{si(j)})^n + b) (Tai - T_{si(j)}) + \sum_{i=1}^{N+1} C_{as} \dot{Q}(n, i) (Tai(i) - Tai) \\ 0 = \sum_{j=1}^{N_{pi}} h_{ri} (T_{si(j)} - T_{rm}) \end{array} \right.$$

La résolution de ce système est effectuée à l'aide du schéma itératif de la figure 52. Les températures de surface sont initialisées avec celles du pas de temps précédent et le processus de résolution se répète jusqu'à convergence des températures des surfaces intérieures.

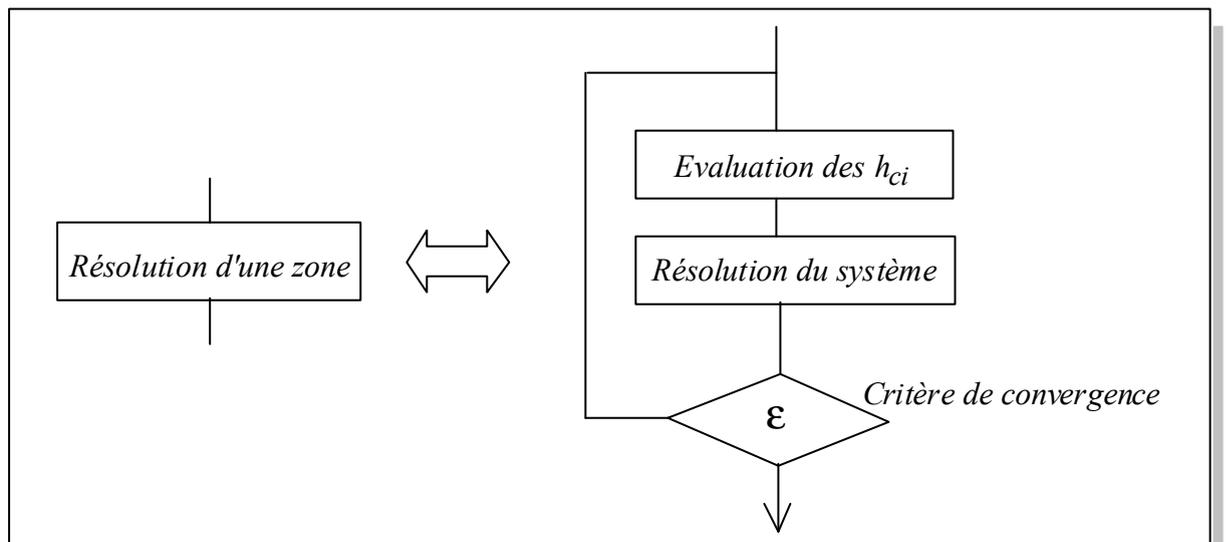


Fig. 52 : Intégration des non linéarités

#### 2.6.2.4.4. L'intégration d'un système de climatisation sensible :

L'intégration d'un système de climatisation est faite de manière idéale, supposant un brassage important du volume d'air, homogénéisant les températures d'ambiance et de soufflage. A ce moment, deux types de problèmes sont à résoudre : Dans le premier (exemple du dimensionnement d'une installation), la température de consigne (ou la fourchette) est connue et l'inconnue du système est alors la puissance sensible à mettre en jeu. Dans le second, la puissance appelée est connue et la température est à déterminer.

Lors du démarrage des calculs liés à un pas de temps donné, il n'est pas possible de savoir avec certitude lequel de deux problèmes précédents est à résoudre. L'algorithme d'intégration du système de climatisation est alors du type *essai- erreur*. L'algorithme le plus simple demande la résolution alternative de ces deux systèmes, selon l'organigramme de principe suivant :

avec :

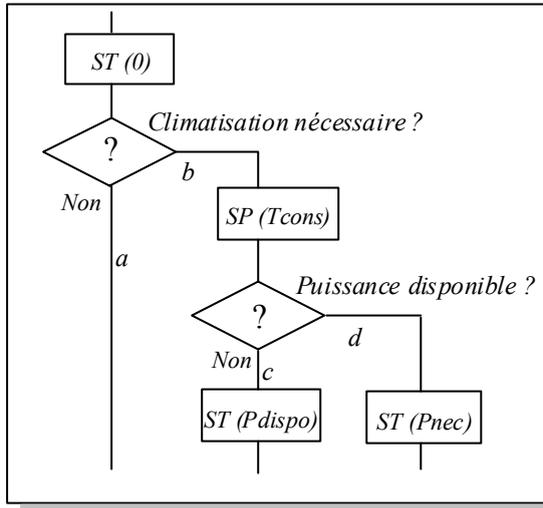


Fig. 53 : Algorithme de régulation

$ST(0)$  : résolution du système en température, la puissance sensible de climatisation étant nulle.

$SP(Tcons)$  : résolution du système en puissance, la température de l'air de la zone étant égale à la consigne désirée.

$ST(Pdispo)$  : résolution du système en température, la puissance sensible de climatisation appelée étant égale à la puissance maximale disponible.

$ST(Pnec)$  : résolution du système en température, la puissance sensible de climatisation appelée étant égale à la puissance nécessaire au maintien de la consigne en température.

Au départ, en tablant sur l'absence de déclenchement du système de climatisation, la puissance mise en jeu est nulle et la température sèche intérieure est alors déterminée. Selon sa valeur par rapport aux consignes du système de climatisation, l'hypothèse de non déclenchement est validée (*a*) ou infirmée (*b*). Dans ce dernier cas, la consigne à atteindre est connue et permet de calculer la puissance nécessaire à son maintien. Si cette puissance est disponible (*d*), le calcul est terminé. Sinon (*c*), il est de nouveau nécessaire de résoudre le système en température en mettant en jeu la puissance disponible.

Un autre algorithme est aussi utilisé [Robin 91a], lequel optimise sensiblement le temps de calcul en tenant compte pour un pas de temps donné des conditions de climatisation du pas de temps précédent.

### 2.6.3. L'implantation informatique :

#### 2.6.3.1. Cas général :

L'aspect multi-modèle, associé à notre processus de connexion des zones, nous conduit à adopter une structuration des données de calcul que nous allons expliciter. Notre objectif dans ce paragraphe est d'expliquer la manière dont sont gérés les objets nécessaires à l'établissement et à la résolution de l'équation matricielle d'état de chaque zone, puis à la méthode de couplage, ce du point de vue informatique.

Le comportement d'une zone étant régi par son équation d'évolution d'état ( $C \dot{T} = A T + B U$ ), il est nécessaire de disposer des matrices  $[A]$ ,  $[C]$  et  $[B]$ . Le terme  $B U$  ayant la dimension d'un vecteur, vis à vis de l'implantation informatique, nous adoptons une forme sensiblement différente de l'équation d'évolution d'état, à savoir  $C \dot{T} = A T + B$ ,  $B$  désignant désormais un vecteur. Pour connaître l'évolution thermique de la zone, il faut connaître  $[C]$ ,  $[A]$  et  $\{B\}$ . La matrice  $C$  est simple à remplir, car diagonale et constituée des capacités thermiques attribuées aux noeuds de discrétisation. Cependant,  $A$  regroupe tous les termes de couplage linéaire entre les noeuds, et  $B$  rassemble diverses sollicitations. Afin de simplifier l'automatisation du remplissage des deux éléments précédents,  $A$  et  $B$  sont décomposés en plusieurs éléments du même type, chaque élément étant caractéristique d'un mode de transfert ou d'une condition limite. Ainsi,

$$A = A_{COND} + A_{CVI\_L} + A_{CVE\_L} + A_{LWI\_L} + A_{LWE\_L} + A_{AERAUL} + A_{CONNEX}$$

$$B = B_{CVI\_NL} + B_{CVE\_L} + B_{SWI} + B_{AERAUL} + B_{CLIM} + B_{QI} + B_{BIL\_PZ} + B_{CONNEX}$$

Par exemple, la matrice  $A_{COND}$  (symétrique) rassemble tous les termes liés aux conductances thermiques reliant les noeuds de discrétisation des parois de la zone considérée. Les tableaux suivants précisent l'affectation des matrices et vecteurs :

Matrice	composée des conductances ...
$A_{COND}$	... des noeuds de paroi
$A_{CVI\_L}$	... convectives intérieures linéarisées, liant les noeuds de surface intérieurs et de température sèche de l'air de la zone
$A_{CVE\_L}$	... convectives extérieures linéarisées, liant les noeuds de surface extérieurs au noeud de température extérieure
$A_{LWI\_L}$	... radiatives intérieures linéarisées de grande longueur d'onde, liant noeuds de surface intérieurs et noeud de température radiante moyenne de la zone
$A_{LWE\_L}$	... radiatives extérieures linéarisées de grande longueur d'onde, liant les noeuds de surface extérieurs au noeud de température du ciel

$A_{AERAUL}$	... aérauliques, liant les noeuds de température d'air des zones entre eux et avec le noeud de température d'air extérieur
$A_{CONNEX}$	... convectives et radiatives linéarisées, reliant un noeud de connexion à la température d'air et radiante moyenne de la zone adjacente.

Vecteur	composé des ...
$B_{CVI\_NL}$	... densités de flux échangées dans le cas de la convection intégrée de façon non linéaire
$B_{CVE\_L}$	... termes indépendants de la température des densités de flux convectifs
$B_{SWE}$	... sollicitations de courte longueur d'onde agissant sur les noeuds de surface extérieurs
$B_{SWI}$	... sollicitations de courte longueur d'onde agissant sur les noeuds de surface intérieurs
$B_{AERAUL}$	... termes des flux aérauliques indépendants des températures des zones du bâtiment
$B_{OI}$	... charges internes sensibles
$B_{BIL\_PZ}$	... termes liés au bilan de puissance, la température étant connue
$B_{CONNEX}$	... termes indépendants des températures de la zone pour laquelle on remplit les termes de connexion
$B_{LWI\_NL}$	... densités de flux radiatifs de grande longueur échangées de façon non linéaire

### 2.6.3.2. Exemple :

Ce paragraphe explicite la méthode sur le cas d'un bâtiment bizona simplifié supposé sans plafond et plancher et dont un croquis de la vue en coupe horizontale est donné figure 54. Le modèle conductif choisi dans chacune des parois est du type R2C. La discrétisation conduit à disposer 18 noeuds de température dans ce bâtiment.

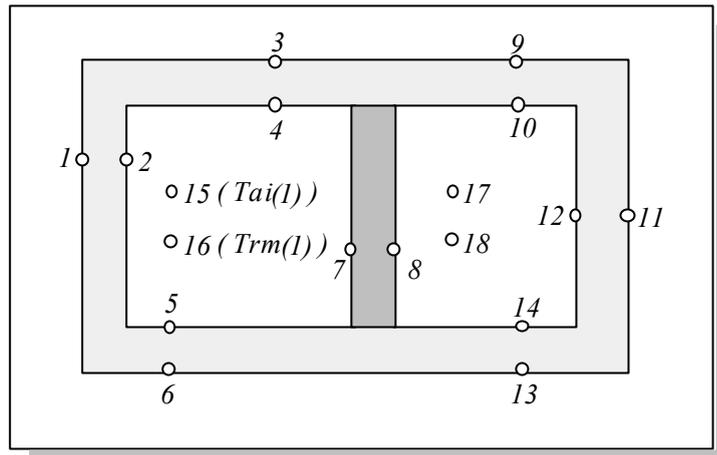


Fig. 54 : Maillage d'un bâtiment bizona simplifié.

Dans le cas de la résolution directe du système couplé, le vecteur d'état est constitué des températures des noeuds indicés de 1 à 18. Le système à résoudre est alors de dimension 18. Etant donné la définition du modèle d'une zone, le vecteur d'état de la première zone est composé de  $(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_{15}, T_{16})$ , tandis que celui de la seconde zone regroupe les températures  $(T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{17}, T_{18})$ .  $T_7$  et  $T_8$  sont des composantes de chacun des vecteurs d'état, car les deux noeuds de discrétisation correspondants appartiennent à la zone de recouvrement (hachurée sur le schéma). Chacun des systèmes élémentaires est alors de dimension 10. Pour chacune des deux zones, il s'agit alors de résoudre l'équation matricielle d'état, qui détermine l'évolution du vecteur d'état considéré.

Lors de la résolution d'une zone (par exemple la zone 1), il est nécessaire de connaître les conditions aux limites avec les zones adjacentes (la zone 2). Ces conditions aux limites, intervenant sur les noeuds de connexion, sont des flux. L'attribut précédent nécessite une précision d'information, c'est à dire la zone pour laquelle le noeud assure la connexion. Ainsi, sur le schéma précédent, le noeud 8 est noeud de connexion vis à vis de la première zone, alors que le noeud 7 joue ce rôle vis à vis de la seconde zone.

Cette notion établie, si le flux radiatif de courte longueur d'onde ne pose pas problème, la détermination des flux convectifs et radiatifs de grande longueur d'onde nécessite (de par les modèles implantés) la connaissance des températures sèches et radiantes moyennes des zones adjacentes. Ainsi, pour le bilan radiatif du noeud 8, il faut disposer des valeurs de  $T_{17}$  et  $T_{18}$  correspondant au même instant.

Pour la première zone, une illustration d'une partie de la décomposition du paragraphe précédent peut alors être donnée. Pour simplifier l'écriture, les transferts convectifs intérieurs sont intégrés avec un modèle linéaire à coefficient d'échange  $h_{ci}$  constant, de même que les transferts radiatifs intérieurs (avec  $h_{ri}$ ). Pour deux noeuds de paroi  $i$  et  $j$ , la conductance les reliant est notée  $K_{ij}$ .

$$A_{COND} = \begin{bmatrix} -K_{12} & K_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{12} & -K_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{34} & K_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{34} & -K_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{56} & K_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{56} & -K_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{78} & K_{78} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{78} & -K_{78} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

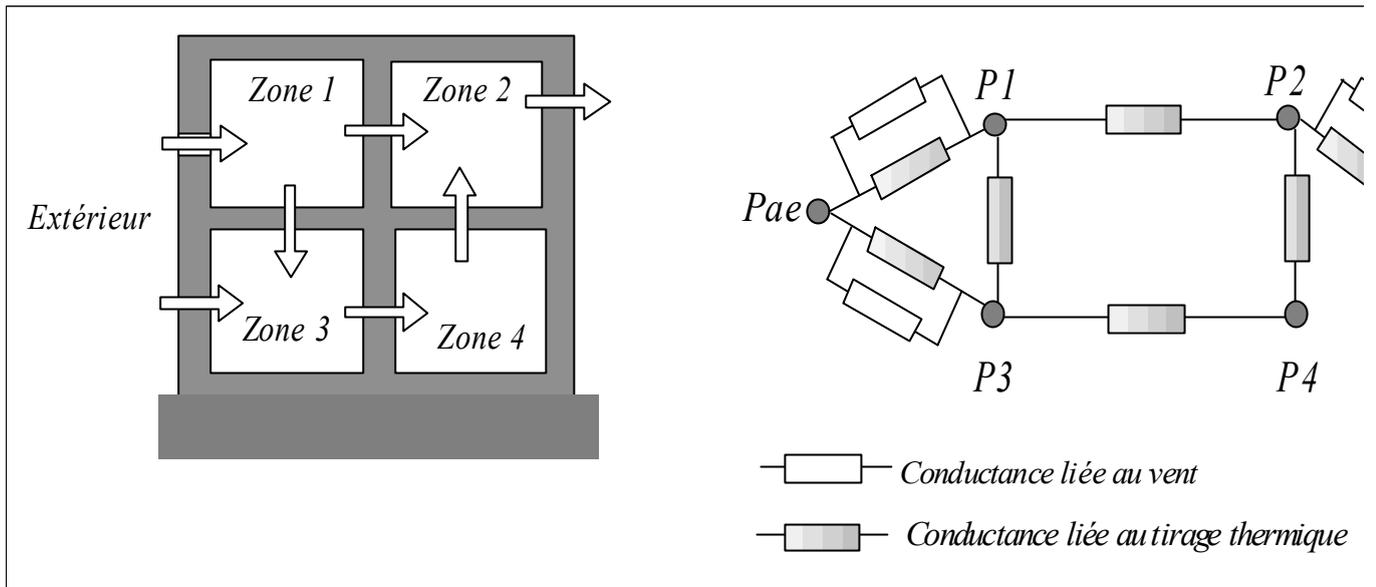
$$A_{CVI} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -h_{ci} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -h_{ci} & 0 & 0 & 0 & 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -h_{ci} & 0 & 0 & 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_{ci} & 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{CONNEX} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(h_{ci} + h_{ri}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{CONNEX} = \left. \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_{ci} T_{17} + h_{ri} T_{18} \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

## **2.7. Conclusion :**

Compte tenu de notre objectif de modélisation multizone, ce chapitre établit le modèle thermique d'un bâtiment en proposant une méthode de couplage par recouvrement des sous-systèmes zones thermiques introduits au chapitre I. Pour établir le modèle thermique élémentaire d'une zone, la conduction, la convection et le rayonnement, ainsi que leur couplage, sont traités à l'aide de l'analyse nodale. Le modèle élémentaire d'une zone tire alors parti d'une écriture matricielle du problème, facilitant en premier lieu son établissement automatique. Nous reviendrons sur ce point au chapitre concernant l'architecture informatique et plus précisément lors du détail de l'organisation du module thermique. Ensuite, en raison de l'uniformisation syntaxique des modèles de transfert de chaleur [Perez Sanchez 89], il nous est alors possible d'intégrer pour un même mode de transfert de plusieurs modèles de niveaux de complexité croissants. Ce modèle thermique est celui autour duquel ont été construits les modèles des transferts d'humidité et aérauliques. Cette position centrale explique la densité de ce second chapitre. Dans ce modèle hygro-thermique du bâtiment, pour des raisons numériques liées à notre stratégie de résolution, nous avons découplé les transferts aérauliques. Ils font l'objet du chapitre suivant.

## **Chapitre 3 : Le modèle aéraulique**





Chapitre 3 : Le modèle aéraulique .....	109
3.1. Introduction.....	112
3.2. Les effets moteurs.....	113
3.2.1. Le vent : .....	114
3.2.2. Le tirage thermique : .....	116
3.2.3. Le couplage des effets : .....	118
3.2.3.1. Le couplage par ajout des pressions : .....	118
3.2.3.2. Le découplage .....	119
3.3. Modèle aéraulique en pression .....	120
3.3.1. L'équation de débit : .....	120
3.3.2. Le système à résoudre : .....	121
3.3.3. La représentation nodale du bâtiment : .....	124
3.4. Problématique des grandes ouvertures.....	125
3.4.1. Les grandes ouvertures intérieures : .....	125
3.4.1.1. Approche transfert de masse : .....	125
3.4.1.1.1. Approche simplifiée : .....	127
3.4.1.1.2. Prise en compte de la stratification .....	127
3.4.1.1.3. Le couplage avec la VMC .....	128
3.4.1.2. L'approche transfert de chaleur : .....	128
3.4.1.2.1. Au départ de l'équation de Bernoulli : .....	128
3.4.1.2.2. Les corrélations expérimentales.....	129
3.4.1.3. L'intégration aux codes de calcul : .....	130
3.4.1.3.1. Le modèle de Walton : .....	130
3.4.1.3.2. Le modèle de Khodr Mneimne : .....	131
3.4.2. Les grandes ouvertures extérieures : .....	134
3.4.3. Les grandes ouvertures intérieures horizontales : .....	135
3.5. La résolution du système non linéaire en pression : .....	136
3.5.1. La méthode de Newton Raphson : .....	136
3.5.2. Les améliorations rencontrées.....	139
3.5.3. Quels choix et quels résultats ? : .....	140
3.6. Aspects informatiques du modèle aéraulique .....	142
3.6.1. Les algorithmes du modèle : .....	142
3.6.2. Aspects numériques de la résolution du système : .....	144
3.7. Conclusion : .....	145

### 3.1. Introduction

La détermination des débits aérauliques est d'une grande importance pour les logiciels de simulation détaillée, ces débits assurant le plus souvent un couplage thermique important entre le bâtiment et l'extérieur d'une part et entre les zones thermiques d'autre part. C'est ainsi que le renouvellement d'air constitue environ 30 % des déperditions énergétiques d'un immeuble collectif en période de chauffe [Passard 90]. Par ailleurs, entre deux zones séparées par une porte standard, une différence de 0.1 K se traduit par un débit échangé de l'ordre de 120 m<sup>3</sup>/h [Pelletret 89b].

Ces débits jouent aussi un rôle majeur dans la migration de l'humidité dans le bâtiment (confort, risques de condensation locale, ...), ainsi que vis à vis de la dispersion des polluants (mouvements de fumées, gaz, ...).

L'introduction précédente exclut de fait les modèles aérauliques unizones, considérant que l'ensemble du bâtiment est à une pression unique. Ces modèles, s'ils sont simples, ne sont pas applicables aux bâtiments où les partitions intérieures contrarient fortement les mouvements d'air. De même, cette introduction place notre propos d'un point de vue résolument macroscopique, dans la mesure où le but à atteindre n'est pas de déterminer en chaque point de l'espace le champ des températures, des pressions et des vitesses moyennes. Cette dernière approche s'obtient en considérant pour des volumes de contrôle infinitésimaux les équations de Navier Stokes associées à certaines simplifications [Marenne 85].

Compte tenu du cadrage précédent, une classification des modèles aérauliques multizones a été effectuée en fonction de leur champ préférentiel d'application [Khodr Mneimne 91] :

**Classe C1** : ensemble des modèles à scénarios prédéfinis. Les débits interzones sont supposés connus, débits pouvant au mieux être modulés en leur adjoignant un profil horaire (à définir par l'utilisateur).

**Classe C2** : modèles prenant en compte les variations du champ de température sans calcul des champs des pressions. Ces modèles permettent alors la prise en compte des échanges par tirage thermique entre les zones internes d'un bâtiment.

**Classe C3** : modèles fins basés sur un calcul, à chaque pas de temps des champs de pression. Les effets du vent, de la ventilation mécanique et du tirage thermique sont intégrés.

Le caractère multimodèle de notre outil nous incite à intégrer un modèle simplifié (par exemple utilisable en Avant Projet Sommaire) et un outil détaillé. Pour ce dernier, faisant partie de la classe C3, le module correspondant répond à la structure suivante :

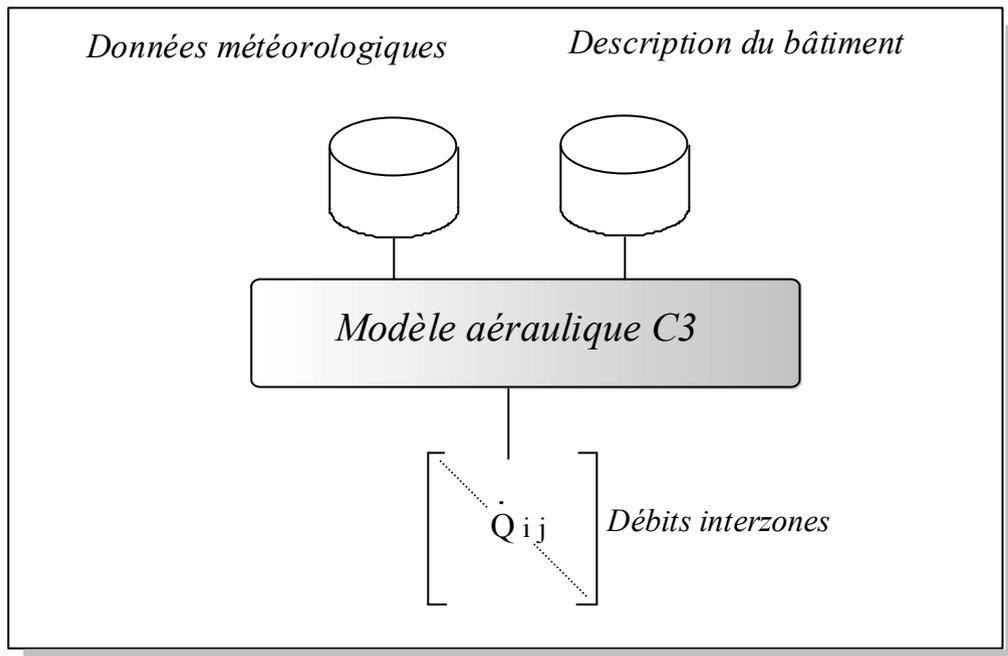


Fig. 55 : Organisation module aéraulique

Fonction du climat, ces transferts aérauliques sont considérés sous différents aspects. Sous les climats tropicaux, la ventilation naturelle (climatisation passive) intervient principalement au niveau du confort intérieur, au travers d'une vitesse d'air favorisant l'évapo-transpiration. Dans cette optique, des approches dites des coefficients réducteurs de vitesse sont en cours. En climat tempéré et froid, l'aspect énergétique de ces transferts est dominant. En effet, en raison d'une meilleure isolation des bâtiments, le poste occupé par la ventilation dans la consommation énergétique ne cesse de voir son importance croître.

En plus de certains aspects intrinsèques à la modélisation (caractéristiques phénoménologiques peu maîtrisées tels les coefficients de décharge, de pression, de perméabilité, ...), il est à noter que les modèles aérauliques souffrent cependant du peu de précision accessible au niveau de paramètres d'entrée pourtant sensibles (vitesse et direction du vent principalement).

### 3.2. Les effets moteurs

Les effets physiques motivant les déplacements d'air dans un bâtiment sont bien identifiés, à savoir le vent et le tirage thermique. Ces notions étant détaillées par ailleurs [Roldan 85], nous n'évoquerons ici que les éléments les plus importants nécessaires à la compréhension de l'exposé. La ventilation mécanique, à travers les bouches d'extraction, constitue par ailleurs un moteur, dont les débits ou caractéristiques débit-pression sont supposés connus. Nous intégrerons par la suite la ventilation mécanique contrôlée (VMC) à nos équations au travers des bilans massiques. Ces effets moteurs étant rapidement passés en revue, se pose le problème de leur couplage dans le cas du bâtiment.

### 3.2.1. Le vent :

Le niveau de finesse de notre modèle ne prend pas en compte le caractère fluctuant de ces sollicitations, tout d'abord à cause des temps de calcul alors nécessaires, mais surtout en raison des données disponibles pour alimenter notre modèle. Deux problèmes se posent alors : sur le site considéré, sauf expérimentation, les caractéristiques du vent sont déterminées en transposant celles de la station météorologique la plus proche. Ensuite, les données liées au vent disponibles dans les fichiers météorologiques ne sont généralement que celles moyennées sur le pas de temps considéré (le plus souvent l'heure). L'évolution des débits aérauliques dans un bâtiment est donc assimilée à une succession d'états permanents. Chacun de ces états permanents est celui que posséderait le bâtiment si les sollicitations (vitesse et direction du vent, températures, débits de ventilation mécaniques) moyennées durant le pas de temps lui étaient appliquées.

Avec les restrictions précédentes, le vent exerce à la côte  $z$  une pression aérodynamique sur un obstacle, pression donnée par la formule suivante :

$$\overline{P(z)} = \frac{1}{2} \rho \overline{C_p} \overline{v(z)}^2$$

avec  $\overline{P(z)}$  pression aérodynamique moyenne [Pa]  
 $\overline{C_p}$  coefficient de pression moyen  
 $\overline{v(z)}$  vitesse moyenne du vent [m/s]

Le coefficient de pression moyen, valeur signée, dépendant de la direction du vent, traduit une pression exercée si le coefficient est positif, et une dépression dans l'autre cas. La valeur de ces coefficients est issue d'études expérimentales faites en soufflerie [Gandemer 78] ou de simulations numériques. Les résultats se présentent alors sous la forme d'une cartographie des coefficients, telle que celle de la figure 56, pour un bâtiment du type tour R+12 et exposé à un vent de direction faisant un angle de  $60^\circ$  par rapport à la normale de la première face.

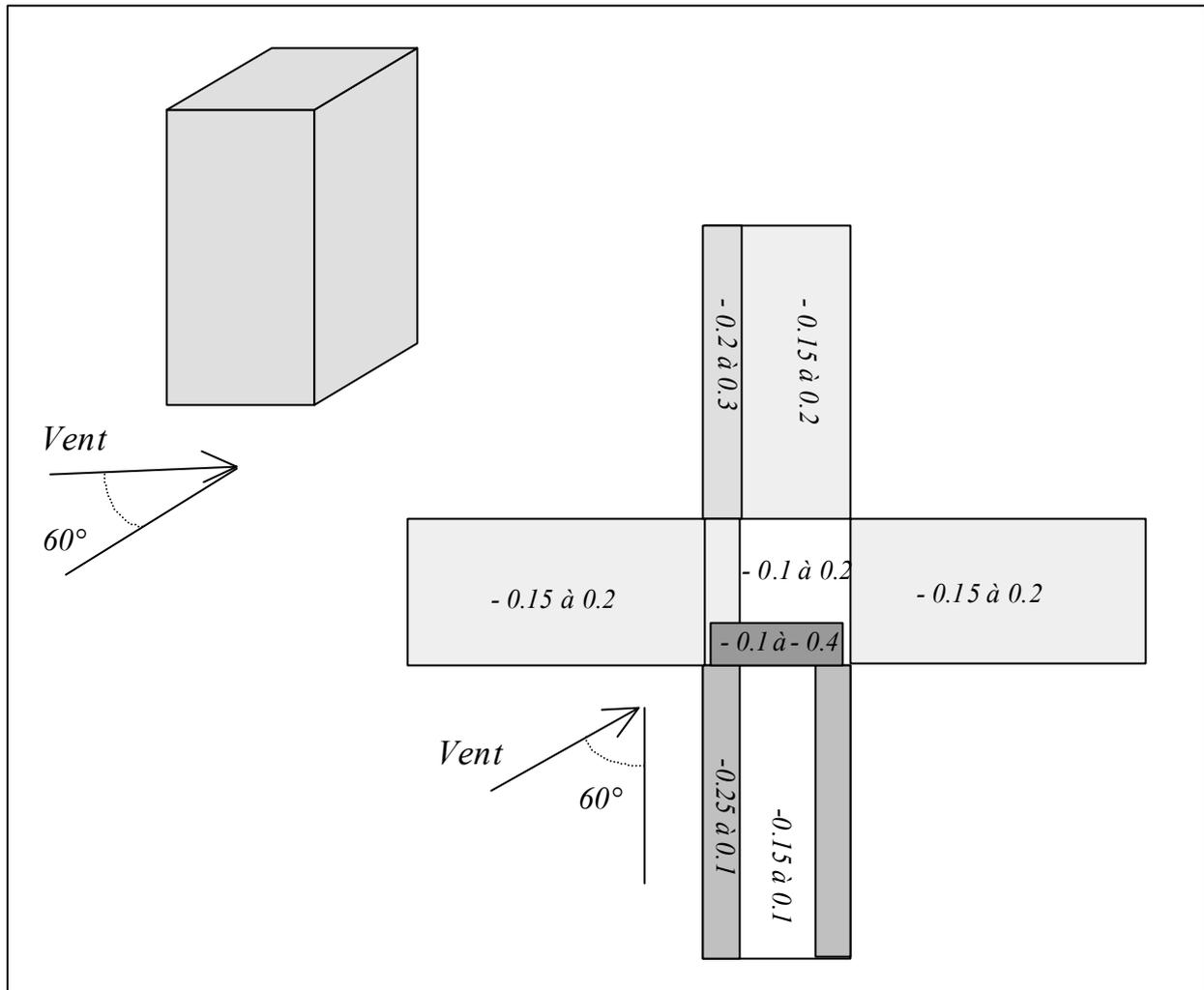


Fig. 56 : Cartographie des coefficients de pression

Même sur un bâtiment de morphologie aussi simple que le précédent, la dispersion dans l'espace des coefficients de pression est problématique vis à vis d'un code de calcul. La simplification adoptée consiste à ne conserver tout d'abord qu'un seul coefficient de pression par façade. Cependant, ces coefficients varient aussi de manière importante avec l'angle d'incidence du vent, la morphologie du bâtiment et son environnement d'implantation. Des travaux ont alors permis d'établir des coefficients de pression moyens pour trois types de bâtiments (maison individuelle, plot R+4, tour R+12), pour trois types d'environnement (zone rurale avec et sans environnement, zone urbaine), ce pour six angles d'incidence du vent ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ) [Gandemer 78]. Le nombre de coefficients à connaître est alors de 126 pour mettre en oeuvre ce modèle. Les valeurs des coefficients pour des angles d'incidence différents sont obtenus en utilisant une série de Fourier limitée à l'ordre 6. C'est ce modèle qui a été implanté dans notre outil.

Walton propose un modèle simplifié par rapport au précédent, à l'aide de la formulation suivante [Krauss 90] :

$$C_p = 0.75 - 1.05 \frac{\alpha}{90} \quad \text{pour } 0 < \alpha < 90^\circ$$

$$C_p = -0.45 + 0.15 \frac{\alpha}{90} \quad \text{pour } 90^\circ < \alpha < 180^\circ$$

$\alpha$  désignant l'angle d'incidence du vent [degrés]

### 3.2.2. Le tirage thermique :

Dans un fluide au repos tel que l'air d'une pièce (en l'absence de perturbation), il existe un gradient de pression dû uniquement au champ de masse volumique.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

avec  $P$  pression hydrostatique [Pa]

Par ailleurs, la masse volumique de l'air dépend de la température au travers de la relation suivante :

$$\rho(T) = \rho(T_0) \frac{T_0}{T_0 + T}$$

avec  $T_0$  température de l'air dans les conditions standards, 273.1 K  
 $\rho(T_0)$  masse volumique de l'air dans les conditions standards, 1.293 kg/m<sup>3</sup>  
 $T$  température de l'air exprimée en degrés Celsius [°C]

De ce fait, une ouverture séparant deux volumes d'air à des températures différentes va être le siège d'un débit, en raison des pressions différentes de part et d'autre de l'ouverture. Considérons sur la figure 57 deux pièces indicées par 1 et 2 et séparées par une paroi. En négligeant la stratification de l'air des pièces et en supposant connue pour chacune des pièces une pression de référence (celle du niveau du plancher par exemple), l'écart de pression à la côte  $z$  est exprimable simplement :

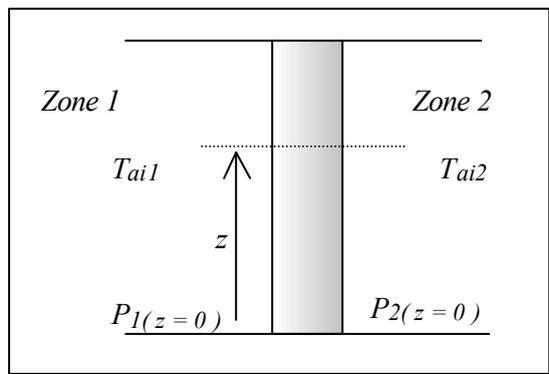


Fig. 57 : Tirage thermique

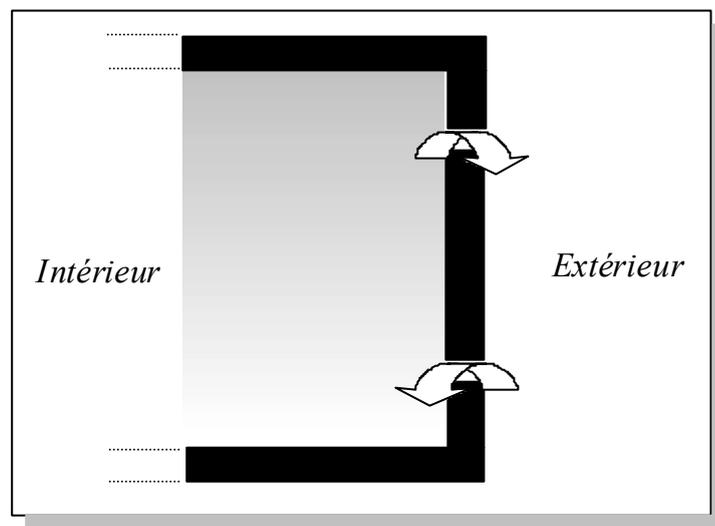
dans la zone 1,

$$P1(z) = P1(z=0) - \rho(T_{a1}) g z$$

donc,

$$P1(z) - P2(z) = P1(0) - P2(0) - (\rho(T_{a1}) - \rho(T_{a2})) g z$$

L'équation précédente montre en particulier que la différence de pression varie avec la cote de manière explicite, mais aussi implicitement au travers de la température. D'un point de vue physique, la masse volumique varie aussi avec la cote en raison de la stratification thermique de l'air. Sur la figure suivante, nous représentons une vue en coupe d'un local chauffé en contact avec l'extérieur (conditions d'hiver). Deux petites ouvertures, placées l'une en bas et l'autre en haut, permettent des échanges d'air entre ce local et l'extérieur. Dans ces conditions, la stratification de l'air du local conduit à une masse d'air chaud près du plafond. Comme indiqué figure 58, cette zone est ainsi en surpression par rapport à l'extérieur et de l'air chaud est ainsi rejeté. Près du plancher, l'effet inverse se produit, conduisant à une entrée d'air froid. En l'absence d'autres éléments, les débits massiques entrants et sortants sont égaux.



*Fig. 58 : Débits résultant du tirage thermique*

La hauteur pour laquelle la différence de pression s'annule, hauteur de l'axe neutre, peut être déterminée par le calcul. La dépendance de  $\rho$  avec la température complique sensiblement notre problème lorsque la stratification de l'air est prise en compte. Cependant, en supposant un gradient de température linéaire, l'étude numérique, appliquée au cas des grandes ouvertures, montre que, pour des pièces de dimension courante présentant des gradients de température importants (10 K), les débits obtenus sont très proches de ceux ne considérant pas de stratification [Van der Maas 92].

La différence de masse volumique, motivant le tirage thermique, peut aussi être causée par une différence d'humidité spécifique entre les volumes d'air.

### **3.2.3. Le couplage des effets :**

Dans un bâtiment, les deux effets précédents se combinent pour donner à un moment donné une distribution des débits. En reprenant le cas du local de la figure 58, et en supposant un vent perpendiculaire à la paroi considérée, il est possible de combiner graphiquement les écarts de pression :

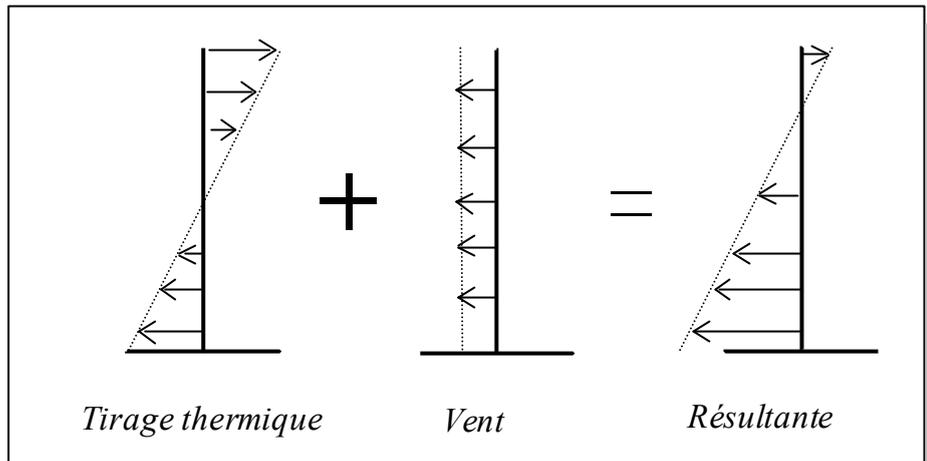


Fig. 59 : combinaison des écarts de pression

Dans certains cas particuliers, certains aspects de cette combinaison sont prévisibles. C'est ainsi que le tirage thermique sera plus important dans un bâtiment de hauteur importante ou qu'il sera prépondérant par rapport aux effets du vent lorsque la vitesse de ce dernier est faible.

L'étude analytique ne peut être conduite que pour des cas simples, concernant un bâtiment monozone et un nombre réduit d'ouvertures [Cadiergues 77]. La pression de référence du local étant alors une inconnue intermédiaire, l'écriture du bilan massique de l'air du local permet de trouver la pression intérieure et donc les débits. Avec la prise en compte de la ventilation mécanique [Allard 89], cette approche analytique montre ses limitations et ne laisse entrevoir pour le cas des bâtiments multizones que des solutions numériques.

### 3.2.3.1. Le couplage par ajout des pressions :

Dans une ouverture, l'équation physique régissant le débit fait intervenir l'écart de pression. Le couplage physique des effets précédents consiste à sommer dans les équations précédentes les écarts de pression dus aux deux moteurs. C'est le choix que nous avons fait et le détail des calculs est donné au paragraphe 3.3. Notons tout de même qu'ils conduisent à une organisation assez complexe et à des temps de mise en place des équations à résoudre qui peuvent être importants.

### 3.2.3.2. Le découplage

Cette méthode utilisée dans certains codes de calcul exprime les débits résultant en fonction des débits causés par chacun des moteurs considéré indépendamment. En effet, il est simple de trouver un encadrement du débit réel :

$$\dot{Q}_{max} \leq \dot{Q}_{réel} \leq \dot{Q}_{max} + \dot{Q}_{min}$$

avec  $\dot{Q}_{max}$  débit massique résultant de l'effet dominant  
 $\dot{Q}_{réel}$  débit massique réel, combinant les deux effets  
 $\dot{Q}_{min}$  débit massique résultant de l'effet le plus faible

A travers une ouverture, une méthode de combinaison des effets est de considérer le débit réel comme égal à la moyenne quadratique des deux débits élémentaires. Globalement, la justification d'un découplage est surtout numérique, car les temps de calcul s'en trouvent très réduits. Dans cette optique, Cacavelli propose, pour un bâtiment à simuler, de pré-calculer les débits dus au vent pour un ensemble de couples de vitesse et direction du vent, ainsi que les débits dus au tirage thermique [Cacavelli 88b].

### 3.3. Modèle aéraulique en pression

Dans la réalité physique, les phénomènes thermiques et aérauliques sont liés. Résoudre ce couplage peut se faire en établissant un système (dit couplé) qui regroupe d'une part les équations liées au système thermique et les équations de bilan massique permettant de déterminer les débits. L'écriture d'un modèle mathématique couplé, si elle est possible, cf [Axley 89] ou [Schneider 91], est peu compatible avec notre objectif d'outil à résolution contrôlée. D'autre part, notre choix antérieur de résoudre le couplage thermique des zones au travers d'un schéma itératif ne nous laisse désormais que le choix d'un couplage itératif entre les phénomènes aérauliques et thermiques. C'était chose prévue et nous voulons justement tirer parti de ce schéma itératif pour moduler la précision de l'outil (au travers du choix optionnel du rebouclage thermo-aéraulique et de la finesse du critère de convergence). La figure 60 explicite notre démarche :

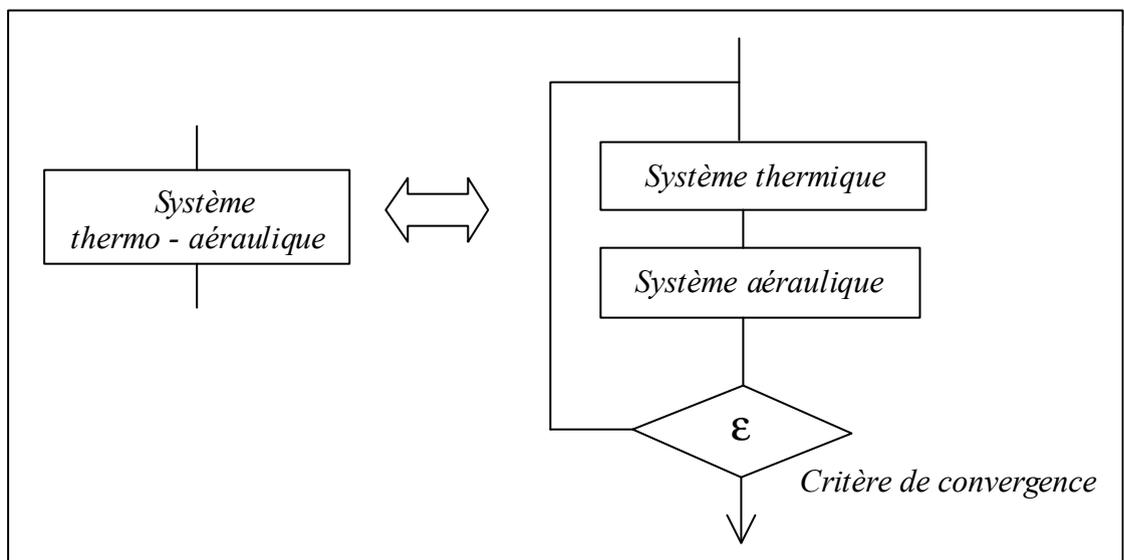


Fig. 60 : Système thermo - aéraulique

Nous nous intéressons dans la suite de ce paragraphe à un bâtiment multizone dont les seules ouvertures sont des petites ouvertures. Au travers de ce type d'ouverture, une fois les pressions fixées, l'air ne circule que dans un seul sens. Une relation existe entre débit et écart de pression, connue sous le nom d'équation de débit ou de crack flow.

#### 3.3.1. L'équation de débit :

Pour une ouverture, il est possible de relier simplement le débit et l'écart de pression à l'aide de la relation suivante :  $\dot{Q} = Cd S (\Delta P)^n$

avec  $Cd$  coefficient de débit et  $n$  exposant de l'écoulement

Le problème est alors celui des valeurs à donner au coefficient de débit et à l'exposant. Pour ce dernier, lorsque les forces de viscosité sont dominantes, l'écoulement peut être considéré comme laminaire et la valeur de  $n$  à choisir est  $1$ . Lorsque les forces dynamiques sont prédominantes, l'écoulement est turbulent et  $n$  vaut alors  $0.5$ . La valeur  $0.67$  est considérée comme "valable" pour les différentes valeurs de pression rencontrées dans l'habitat et pour de petites ouvertures classiques.

Le coefficient de décharge est issu de mesures expérimentales. Il varie beaucoup avec la géométrie de l'ouverture et ses valeurs courantes sont disponibles dans des catalogues. Pour globaliser ce coefficient et la surface de l'ouverture, leur produit a la dimension d'une perméabilité. La relation précédente devient alors  $\dot{Q} = K (\Delta P)^n$ ,  $K$  étant physiquement le débit massique traversant l'ouverture pour un écart de pression de  $1$  Pa.

### 3.3.2. Le système à résoudre :

En raison du découplage thermo-aéraulique, les températures de chacune des zones sont considérées comme connues. L'inconnue du problème est alors la pression de référence de chacune des zones, cette pression de référence étant par exemple celle au niveau du plancher. Nous attribuons dorénavant le caractère extérieur à une petite ouverture si elle donne sur l'extérieur. Dans le cas contraire, nous parlerons de petite ouverture intérieure. Seul l'écart de pression conditionne le débit et nous avons alors pour les deux cas précédents les schémas et équations suivants. Les expressions des écarts de pression sont obtenues en appliquant l'équation de Bernoulli sur une ligne de flux, pour un fluide incompressible et non visqueux :

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho g z = Cste$$

Par ailleurs, la variation de la vitesse de l'air de part et d'autre de l'ouverture est négligée.

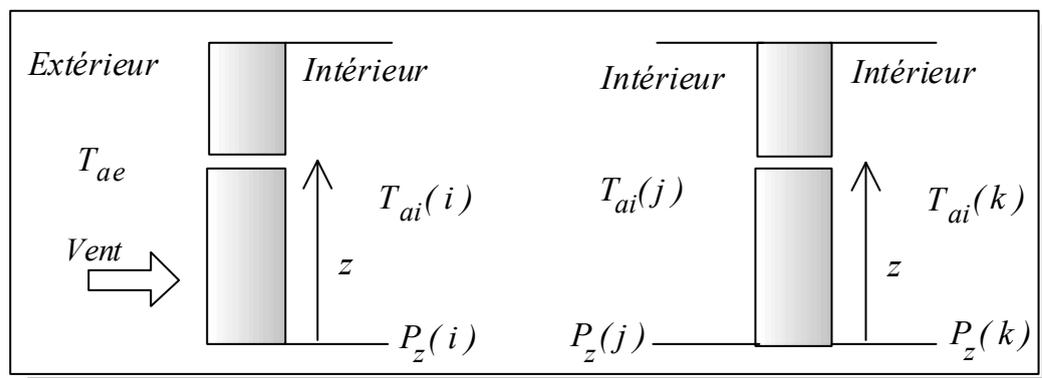


Fig. 61 : Petites ouvertures, extérieure et intérieure

$$\Delta P = P_{ae} + \frac{1}{2}\rho (T_{ae}) C_p v^2 - \rho (T_{ae}) g z - \quad \Delta P = P_z(j) - \rho (T_{ai(j)}) g z -$$

et

$$(P_z(i) - \rho (T_{ai(i)}) g z) \quad (P_z(i) - \rho (T_{ai(k)}) g z)$$

avec  $P_z(i)$  pression de référence de la zone  $i$  [Pa]

La forme de l'équation de débit peut se retrouver simplement à l'aide de l'équation de Bernoulli. Avec les notations précédentes, on a :

$$v_{th} = \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \Rightarrow \dot{Q}_{th} = S \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} = \left(S \sqrt{\frac{2}{\rho}}\right) |\Delta P|^{\frac{1}{2}}$$

avec  $v_{th}$  vitesse théorique de l'air dans l'ouverture [m/s]  
 $\dot{Q}_{th}$  débit volumique théorique [m<sup>3</sup>/s]

La vitesse ainsi trouvée nécessite un facteur correctif pour tenir compte des frottements (le coefficient réducteur de vitesse,  $C_v$ ). De même, en raison de la contraction des lignes de flux dans la section de l'ouverture, il est nécessaire d'introduire un coefficient de contraction  $C_s$ . Pour une ouverture donnée, le produit des deux coefficients précédents est appelé coefficient de décharge,  $C_d$ .

$$\dot{Q} = C_v C_s \dot{Q}_{th} = C_d \dot{Q}_{th} = C_d \left(S \sqrt{\frac{2}{\rho}}\right) |\Delta P|^{\frac{1}{2}}$$

Pour chacune des zones, compte tenu de l'hypothèse d'incompressibilité du volume d'air intérieur, le bilan massique doit être nul. Le système ainsi formé, dit système en pression, admet pour inconnues les pressions de référence de chacune des zones. La ventilation mécanique est simplement prise en compte au travers de valeurs de débits qui sont supposés connues. De cette façon, les bouches de ventilation ne sont pas intégrées de manière très détaillée, comme cela aurait pu l'être en utilisant leur caractéristique débit pression.

En notant alors  $\dot{Q}_{i,j}$  le débit d'air massique passant de la zone  $i$  à la zone  $j$ , l'indice  $0$  étant attribué à l'extérieur, ce système s'écrit sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0, i \neq 1}^{i=N} \dot{Q}(i,1) + \dot{Q}_{vmc}(1) = 0 \\ \sum_{i=0, i \neq 2}^{i=N} \dot{Q}(i,2) + \dot{Q}_{vmc}(2) = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=0}^{i=N-1} \dot{Q}(i,nZ) + \dot{Q}_{vmc}(N) = 0 \end{array} \right.$$

avec  $N$  nombre de zones du bâtiment  
 $\dot{Q}_{vmc}(i)$  débit de ventilation mécanique de la zone  $i$  [kg/s]

Les débits dépendant des écarts de pression au travers d'un exposant fractionnaire (0.67), ce système est non linéaire et sa résolution doit donc faire appel aux techniques de résolution appropriées. Nous y reviendrons au paragraphe 3.5, après avoir intégré les grandes ouvertures.

### 3.3.3. La représentation nodale du bâtiment :

Les équations précédentes permettent d'établir un réseau analogique représentant le problème posé. Chacune des pressions de référence de zone correspond à un noeud du réseau, de même que la pression extérieure. Les ouvertures sont le siège du tirage thermique et des effets du vent (pour celles extérieures) et chacun de ces effets se traduit par une conductance entre les pressions concernées. Pour le bâtiment simplifié (supposé ne comporter que des petites ouvertures) de la figure 62, le réseau analogique correspondant est tracé :

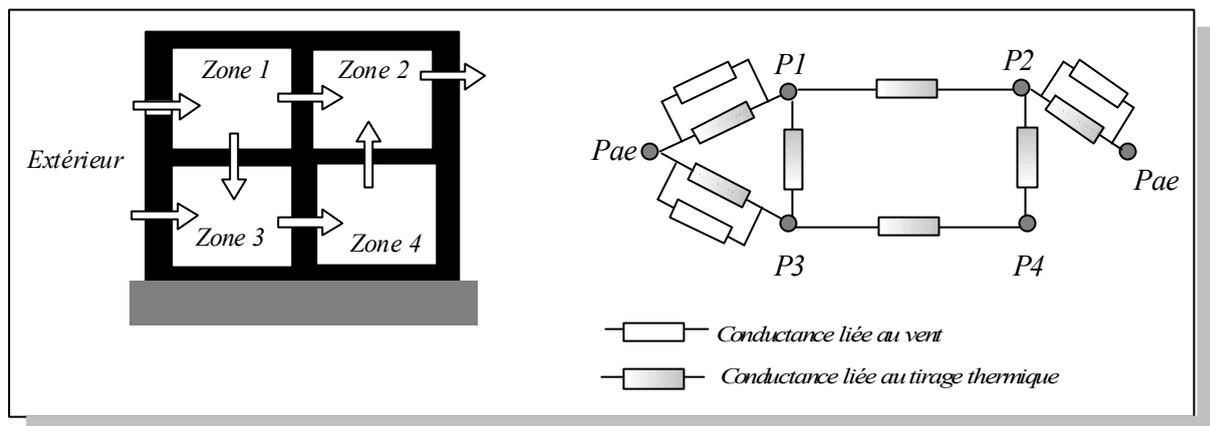


Fig. 62 : Réseau aéraulique

L'hypothèse sous-jacente à cette modélisation par un réseau ne comportant que des conductances est celle du régime permanent. En effet, à chaque pas de temps, le champ des pressions considéré est celui obtenu en supposant les sollicitations constantes sur toute la durée du pas de temps.

En régime dynamique, chaque noeud de pression est affecté d'une capacité aéraulique, qui se traduit par l'introduction dans le schéma électrique de capacités. Cependant, compte tenu de valeur des constantes de temps alors introduites ( $10^{-1}$  à  $10^{-2}$  s) devant celles des sollicitations (quelques dizaines de secondes pour le vent), le régime transitoire sera pratiquement inexistant et le système se retrouve quasi-instantanément en régime permanent [Passard 90]. Vis à vis des pressions, le bâtiment va ainsi se comporter en système suiveur des sollicitations extérieures. Nous en verrons au chapitre 3.4.1 les conséquences au niveau de la résolution.

### **3.4. Problématique des grandes ouvertures**

L'intégration des grandes ouvertures à un code de calcul est problématique, en raison de la possibilité d'avoir des débits à la fois entrants et sortants par ces ouvertures. L'équation de débit, simple, n'est dès lors plus applicable et ce point particulier a longtemps constitué un point d'achoppement des modèles multizones. Les grandes ouvertures, bien que communes dans l'habitat (portes, fenêtres, ...), étaient alors ignorées ou modélisées à l'aide de l'équation de débit. Des progrès étant intervenus depuis peu, des modèles des débits au travers de ces grandes ouvertures sont disponibles.

En plus de la séparation due au caractère intérieur ou extérieur de ces grandes ouvertures, il faut différencier les codes couplant les grandes ouvertures au système en pression vu précédemment de ceux les découplant.

#### **3.4.1. Les grandes ouvertures intérieures :**

Deux approches sont rencontrées pour comprendre les mécanismes des transferts au travers des grandes ouvertures. La première, analytique, dite de transfert de masse, vise à calculer les débits massiques échangés. L'autre est basée sur l'équation de Bernoulli ou des corrélations expérimentales reliant le flux de chaleur échangé à la géométrie de l'ouverture et à l'état thermique de chaque zone.

##### 3.4.1.1. Approche transfert de masse :

L'ensemble des calculs n'est pas développé ici, mais les références bibliographiques suivantes comportent tous les détails nécessaires : [Van der Mass 90], [Allard 92]. Nous nous attachons principalement aux méthodes, aux modèles et à leur incidence vis à vis d'un code de calcul.

Le seul moteur étant le tirage thermique, il y aura autant d'axes neutres que de recouvrements des profils de température de chacune des zones. Le schéma suivant est une vue en coupe de deux zones thermiques séparées par une grande ouverture verticale et présentant un seul axe neutre. En raison des différences de températures de part et d'autre de la séparation, des différences de pression prennent naissance et un profil de vitesse est observé en régime permanent, illustré par la figure 63.

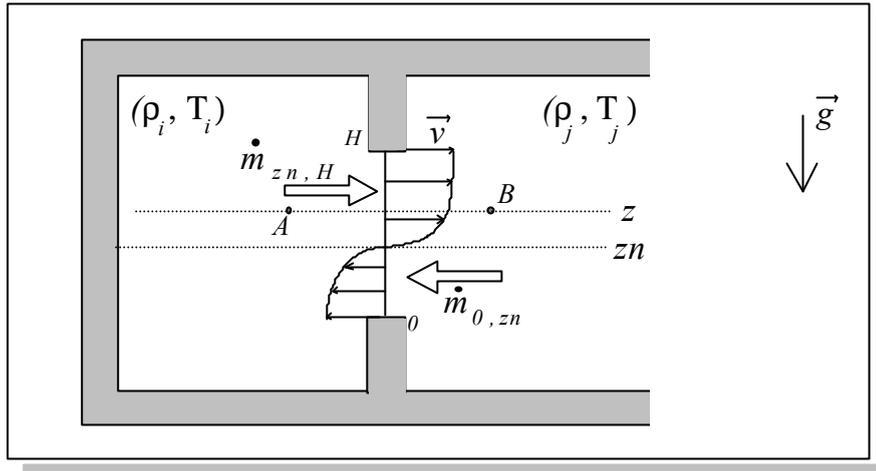


Fig. 63 : Ecoulement gravitationnel au travers d'une grande ouverture verticale

L'application de l'équation de Bernoulli le long d'une ligne de flux (supposée horizontale), en régime permanent pour un fluide incompressible et non visqueux, permet d'écrire :

$$P_i(z) + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v_i^2(z) = P_j(z) + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v_j^2(z) + \frac{1}{2} \rho \zeta v^2(z)$$

vitesse de l'air au travers de l'ouverture

$P_i(z)$  pression dans la zone  $i$  au point A

$P_j(z)$  pression dans la zone  $j$  au point B

$v_i(z)$  vitesse de l'air au point A

$v_j(z)$  vitesse de l'air au point B

$\zeta$  coefficient de perte de charge de l'ouverture

L'écoulement étant considéré comme gravitationnel, on néglige les vitesses d'air de part et d'autre de l'ouverture, soit  $v_i(z)$  et  $v_j(z)$ . La vitesse de l'air dans l'ouverture est alors :

$$v(z) = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_i(z) - P_j(z)|}$$

La différence de pression ne s'annulant qu'en un point, il n'y a dans ce cas qu'un seul axe neutre. Par analogie avec l'équation de débit, on pose  $Cd = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$

Le débit massique traversant une section  $dS$  de l'ouverture est alors :

$$d\dot{m} = \rho(z) v(z) dS = Cd W \sqrt{2 \rho(z) |\Delta P(z)|} dz$$

avec  $W$  largeur de l'ouverture

Pour une portion d'ouverture, délimitée entre deux côtes  $z1$  et  $z2$ , pour laquelle l'écoulement est monodirectionnel, on obtient l'expression suivante pour le débit :

$$\dot{m}_{z_1, z_2} = Cd W \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{2 \rho(z) |\Delta P(z)|} dz$$

Appliqué entre  $z_n$  et  $H$ , le débit massique sortant de la zone  $j$  est alors

$$\dot{m}_{z_n, H} = Cd W \int_{z_n}^H \rho_i v(z) dz$$

et celui passant de la zone  $i$  à  $j$  :

$$\dot{m}_{0, z_n} = Cd W \int_0^{z_n} \rho_j v(z) dz$$

#### 3.4.1.1.1. Approche simplifiée :

L'approche analytique la plus simplifiée considère des températures (et donc des masses volumiques) constantes de part et d'autre de l'ouverture. A ce moment, l'intégrale précédente est calculable directement, à condition de déterminer préalablement la hauteur de la zone neutre (au travers du bilan massique). Par exemple pour  $\dot{m}_{0, z_n}$ , l'expression finale est alors la suivante :

$$\dot{m}_{0, z_n} = Cd \frac{W}{3} (8 g H^3 \left[ \frac{\rho_i}{1 + \left( \frac{\rho_i}{\rho_j} \right)^{1/3}} \right] |\rho_i - \rho_j|)^{0.5}$$

#### 3.4.1.1.2. Prise en compte de la stratification

Le cas où un profil de température est considéré de chaque côté de l'ouverture se rapproche intuitivement plus de la réalité dans le cas des grandes ouvertures. La première complexité est celle du nombre et de la détermination des plans neutres. Les côtes correspondant aux plans neutres sont solution d'une équation du second degré (sans couplage avec la VMC) ou d'une équation *transcendante* lors de la prise en compte de la ventilation mécanique ou du vent. Cette dernière est le plus souvent résolue de manière itérative. Cette difficulté franchie, les intégrales permettant de calculer les débits n'ont pas de solution analytique. Elles sont résolues numériquement, par exemple par la méthode de Simpson dans le cas de *COMIS* [Feustel 89]. Nous ne poursuivons pas plus en détail, car la comparaison entre des modèles des grandes ouvertures intégrant ou négligeant la stratification ne fait pas apparaître de différences vraiment significatives. Ainsi, pour des gradients de température aussi importants que 10 K/m, l'écart entre les résultats produits n'est que de 0.1 % [Van der Mass 92].

#### 3.4.1.1.3. Le couplage avec la VMC

Dans le paragraphe précédent, nous n'avons considéré que les écoulements dus au tirage thermique. Par rapport à la figure 63, la mise en oeuvre d'une bouche de ventilation soufflant de l'air dans la zone  $i$  modifie la position de l'axe neutre. Vis à vis des équations, le débit de la bouche de



Quand bien même des lois permettant de calculer les flux sont issus de cette méthode, la plupart des relations en flux sont basées sur des corrélations expérimentales, qui font l'objet du paragraphe suivant.

### 3.4.1.2.2. Les corrélations expérimentales

En supposant les deux zones (l'une froide l'autre chaude) isothermes et un écart de températures  $\Delta T$ , un coefficient d'échange  $h_T$  entre les deux zones peut être calculé de la manière suivante.

$$h_T = \frac{\Phi}{W H \Delta T}$$

Un nombre de *Nusselt* caractéristique de l'écoulement est alors  $Nu = \frac{h_T H}{\lambda_a}$ ,  $\lambda_a$  étant la conductivité thermique de l'air. Les corrélations trouvées sont alors du type

$$Nu = \frac{C}{3} \sqrt{Gr} \quad Pr = \frac{C}{3} \sqrt{Ra} Pr$$

avec  $C$  coefficient dépendant de l'écart de température caractéristique

La géométrie de l'ouverture n'est pas prise en compte par la corrélation précédente et se présente après correction de la façon suivante :

$$Nu = \frac{C}{3} \left( \frac{W}{Wr} \right) \left( \frac{H}{Hr} \right)^{3/2} (Ra Pr)^{1/2}$$

avec  $Wr$  largeur de référence de la pièce

$Hr$  hauteur de référence de la pièce

La valeur du coefficient  $C$  de la relation précédente est déterminée par le choix de l'écart de température caractéristique. Différents écarts sont utilisés par les expérimentateurs, tels que celui entre les températures moyennes des pièces, les températures mesurées au centre des pièces ou encore les températures moyennes des murs. Pour ce dernier cas, c'est le moyen utilisé pour le conditionnement en température des zones (un mur chaud, un froid) qui guide au choix de cet écart de température. L'écart caractéristique le plus souvent accessible dans les codes de calcul étant celui des températures moyennes des zones, la bibliographie sur les écarts utilisés montre qu'il en existe d'autres assez intéressants, comme par exemple celui basé sur les écarts de températures moyennes des murs [Khodr Mneimne 90]. Un modèle de ce type pourrait tout à fait être intégré dans notre outil. En effet, en l'absence de globalisation des parois dans une zone, nous disposons de toutes les températures des parois formant enceinte de chaque côté. Cet aspect ne peut toutefois concerner que des aspects de recherche en laboratoire, les murs verticaux chauffants ou refroidissants n'étant pas vraiment communs dans l'habitat.

Cette valeur fixée, le nombre de *Nusselt* pouvant s'interpréter comme le rapport de la puissance échangée par convection à celle échangée par conduction dans l'ouverture, nous pouvons trouver, en utilisant la définition du nombre de *Grashof* et la corrélation expérimentale, une expression du flux net :

$$\Phi = \frac{C}{3} \left( \frac{g \beta L^3}{\nu^2} \right)^{1/2} \lambda_a S Pr (\Delta T)^{3/2}$$

avec	$\beta$	coefficient de dilatation volumique	[K <sup>-1</sup> ]
	$\nu$	viscosité cinématique de l'air	[m <sup>2</sup> /s]
	$\lambda_a$	conductivité de l'air	[W/m.K]

### 3.4.1.3. L'intégration aux codes de calcul :

Le paragraphe précédent a fait un point des modèles physiques des flux de chaleur ou de masse au travers des grandes ouvertures. Qu'en est il dans les codes de calcul ?

#### 3.4.1.3.1. Le modèle de Walton :

Le traitement de petites ouvertures ne posant pas de problème, l'idée est de découper une grande ouverture en plusieurs petites ouvertures pour lesquelles l'équation de débit est utilisable. Walton montre que le découpage d'une grande ouverture en deux petites ouvertures, respectivement placées aux  $5/18$  et  $13/18$  ièmes de la hauteur, conduit à une relation du type de la corrélation précédente ( $Nu / Pr = \frac{C}{3} \sqrt{Gr}$ ), à condition de considérer pour chacune des petites ouvertures un coefficient de décharge de  $0.78$  et un exposant pour l'écoulement de  $0.5$  [Walton 84].

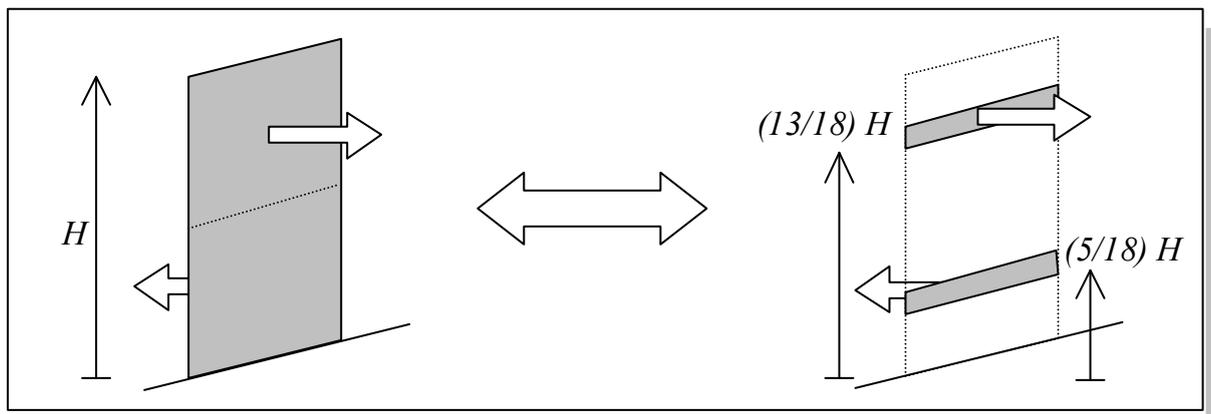
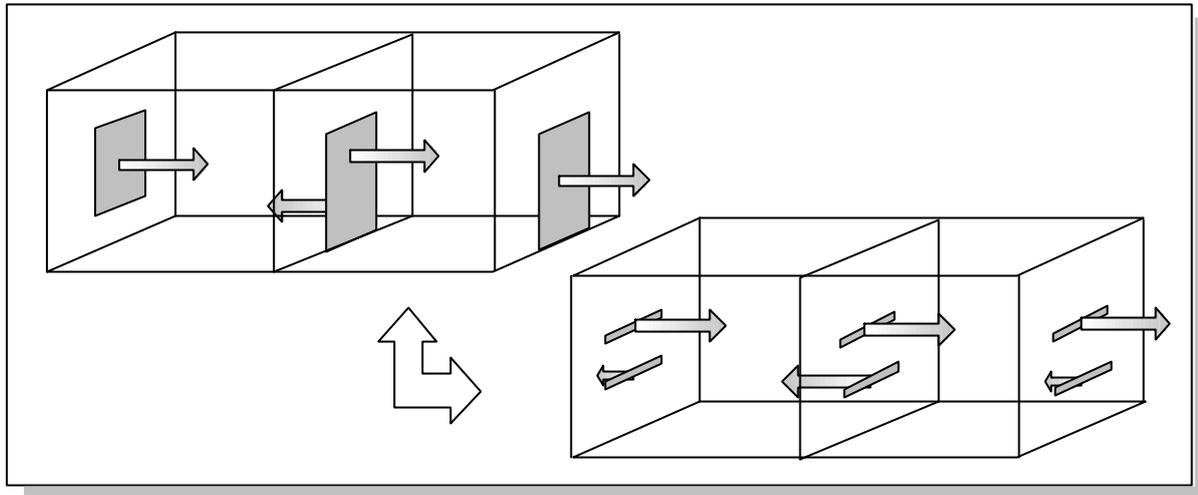


Fig. 65 : Découpage d'une grande ouverture en deux petites ouvertures

Une grande ouverture étant considérée comme deux petites ouvertures particulières (disposition, surface, coefficient de débit et exposant), l'avantage qui nous amène à intégrer ce

modèle est la possibilité de coupler directement les grandes ouvertures au système aéraulique en pression établi au paragraphe 3.3.2. La figure 66 illustre l'utilisation du modèle de Walton pour un bizonne comportant trois grandes ouvertures.



*Fig. 66 : Utilisation du modèle de Walton des grandes ouvertures*

S'il est très pratique, ce modèle est toutefois un modèle en pression, lesquels posent cependant problème dans le cas des grandes ouvertures en raison de la faiblesse des écarts de pression. Dans certains cas, justement lors de la présence de grandes ouvertures intérieures, nous verrons que des problèmes de rapidité de convergence surviennent et qu'il faut faire appel à des techniques particulières pour les surmonter du point de vue numérique.

#### **3.4.1.3.2. Le modèle de Khodr Mneimne :**

Modèle des conductances dues au tirage thermique :

L'auteur propose de considérer qu'une grande ouverture intérieure est obtenue en juxtaposant deux ouvertures, l'une au-dessus de l'axe neutre (à laquelle est associé l'indice  $a$ ), l'autre en dessous (indiquée par  $b$ ). Les résultats expérimentaux (concernant les débits massiques au travers d'une porte) confirment la difficulté de caractériser une grande ouverture par un seul coefficient de décharge  $Cd$ , en raison des doubles débits. Aussi, chacune des ouvertures précédentes est caractérisée par un coefficient de décharge différent, à savoir respectivement  $Ca$  et  $Cb$ . L'étude étant menée pour une porte standard, l'auteur cale le modèle (en jouant sur les coefficients précédents) sur les résultats expérimentaux et trouve ainsi un rapport  $Ca/Cb$  de 3 en convection naturelle et de 2 en convection mixte.

Toujours en utilisant l'écart des températures des zones, pour des configurations différentes de celle de la porte, l'auteur propose des corrélations expérimentales du type

$$\begin{cases} Ca = \frac{Ha}{Hsp} f\left(\frac{Hb}{Hsp}\right) + g\left(\frac{Hb}{Hsp}\right) \\ Cb = \frac{Ha}{Hsp} h\left(\frac{Hb}{Hsp}\right) + k\left(\frac{Hb}{Hsp}\right) \end{cases}$$

avec les notations de la figure 67 :

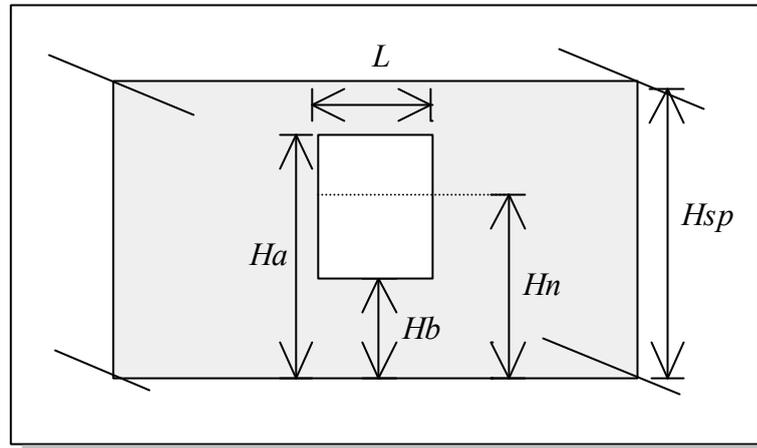


Fig. 67 : Repérage géométrique de la grande ouverture.

Les débits traversant l'ouverture sont alors :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{HnHa} &= \left(\frac{2}{3}\right) Ca L \sqrt{2 \rho_a g |\Delta\rho|} (Ha - Hn)^{3/2} \\ \dot{m}_{HbHn} &= \left(\frac{2}{3}\right) Cb L \sqrt{2 \rho_b g |\Delta\rho|} (Hn - Hb)^{3/2} \end{aligned}$$

Les conductances dues à la ventilation :

Les problèmes que se proposait de résoudre Khodr Mneimne étant principalement ceux liés au tirage thermique et au couplage des moteurs, ces débits de ventilation (mécaniques ou infiltrations) sont supposés connus dans ses travaux. Ne considérant que la ventilation mécanique et les infiltrations, les grandes ouvertures intérieures ne sont le siège de débits que dans un seul sens. L'intégration de ces grandes ouvertures intérieures peut donc se faire simplement en utilisant l'équation de débit, à condition d'être capable de caractériser chacune de ces grandes ouvertures par un coefficient de décharge. A ce moment, les conductances recherchées ( $Kmv$ ) peuvent par exemple être issues d'un modèle aéraulique de classe C3.

Le couplage ventilation et tirage thermique :

Une des originalités de ce travail est de proposer un modèle de couplage de la ventilation (débits connus) et du tirage thermique dans le cas des grandes ouvertures horizontales intérieures. Par rapport à la classification établie page 110, ce modèle donc est de classe C2, car calculant les débits sans détermination des pressions. L'objectif est alors de prendre en compte le tirage thermique au travers des grandes ouvertures intérieures. Par rapport à nos grandeurs, le passage du débit massique à la conductance thermique  $K$  se fait en utilisant :  $K = Cp \dot{Q}$ . Pour une grande ouverture, ce modèle de couplage se présente sous la forme suivante,

$$\begin{cases} Ka = Kt + x Kvmc \\ Kb = Kt + y Kvmc \end{cases}$$

- $Ka$  conductance à travers la partie supérieure de l'ouverture [W/K]
- $Kb$  conductance à travers la partie inférieure de l'ouverture [W/K]
- $Kt$  conductance due au tirage thermique [W/K]
- $Kvmc$  conductance due à la ventilation mécanique [W/K]
- $x, y$  paramètres du couplage

En considérant cette fois l'ensemble du bâtiment, le modèle de couplage de la figure 68 permet de déterminer les conductances entre zones :

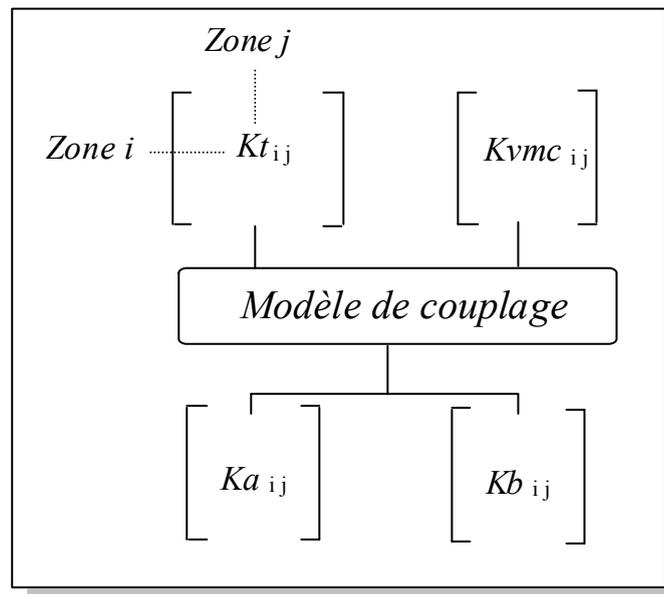


Fig. 68 : Modèle de couplage de KHODR MNEIMNE.

Nous n'avons pas intégré ce modèle, car le calcul des conductances dues à la ventilation est nécessaire dans notre cas pour traiter des grandes ouvertures extérieures, des petites ouvertures et de la VMC. Il nous est donc nécessaire de résoudre le système non linéaire en pression, que l'on intègre ou pas le tirage thermique au travers des grandes ouvertures intérieures. Le système non

linéaire en pression étant cependant sensiblement plus simple, on peut s'attendre à une rapidité de convergence meilleure.

### 3.4.2. Les grandes ouvertures extérieures :

Si des travaux existent pour les grandes ouvertures intérieures, la bibliographie dédiée aux grandes ouvertures extérieures est bien moins fournie. Le modèle d'Aynsley, ne considérant que les effets du vent et limité par la porosité de façades (20 % maximum), est le plus connu [Aynsley 88]. La voie que nous avons choisie est celle de l'utilisation des modèles en pression proposant un découpage en plusieurs petites ouvertures. Au travers des pressions, il est alors possible de prendre en compte les effets du vent sur la face externe de l'ouverture.

En considérant pour chaque ouverture extérieure le découpage de Walton, deux petites ouvertures (ayant des caractéristiques particulières) sont obtenues. Rappelons que la disposition et les caractéristiques sont celles permettant de retrouver la loi de corrélation caractéristique de l'écoulement gravitationnel entre les zones. Pour une ouverture extérieure, cette corrélation n'est plus directement applicable, car ces ouvertures extérieures sont soumises au vent. Pour coupler le phénomène vent au modèle précédent, il suffit de superposer les champs de pression. Le schéma et le commentaire associé suivant expliquent la démarche que nous avons choisie :

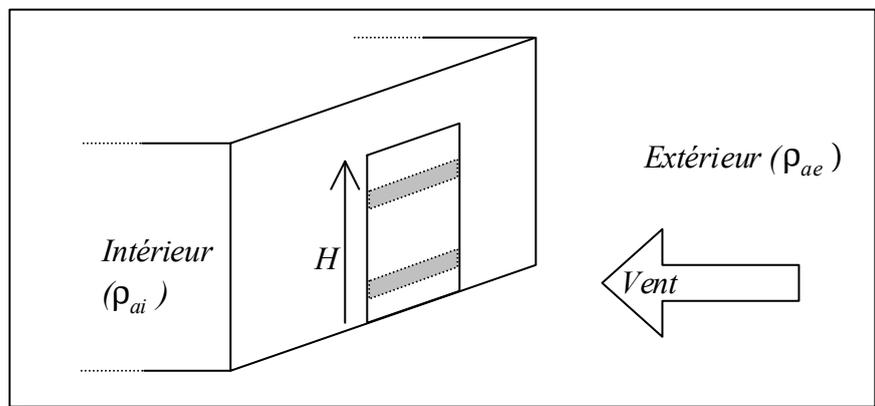


Fig. 69 : Découpage d'une grande ouverture extérieure en deux éléments

Par exemple pour la petite ouverture virtuelle située au bas de la porte, la pression extérieure vaut  $\frac{1}{2}\rho_{ae} C_p v^2 - \rho_{ae} g H (5/18)$ . De même, la pression intérieure est  $P_{ai} - \rho_{ai} g H (5/18)$ .

L'écart de pression total (dû au tirage thermique et au vent) est donc calculable. En faisant de même pour l'ouverture du haut, les grandes ouvertures extérieures peuvent ainsi simplement être couplées au système en pression. Compte tenu de l'uniformité du traitement des grandes ouvertures dans le modèle aéraulique global, cette approche est retenue dans *CODYRUN*.

De la même manière qu'il faut attirer l'attention sur l'utilisation d'un modèle en pression dans le cas des grandes ouvertures, le problème se pose quant à la validité d'un coefficient de pression sur une paroi extérieure comportant une grande ouverture. Pour justifier cette démarche, il vaut mieux parler d'ouverture moyenne, telles que certaines configurations d'ouvertures par exemple rencontrées dans l'habitat tropical, tel qu'à la Réunion. Ces ouvertures, connues sous le nom de *Nacos* [Dreyfus 60] (du nom du brevet Australien) sont constituées de lames de verre ou d'aluminium, orientables pour moduler la perméabilité de l'ouvrant. La figure 70 explicite la constitution de ce type d'ouverture :

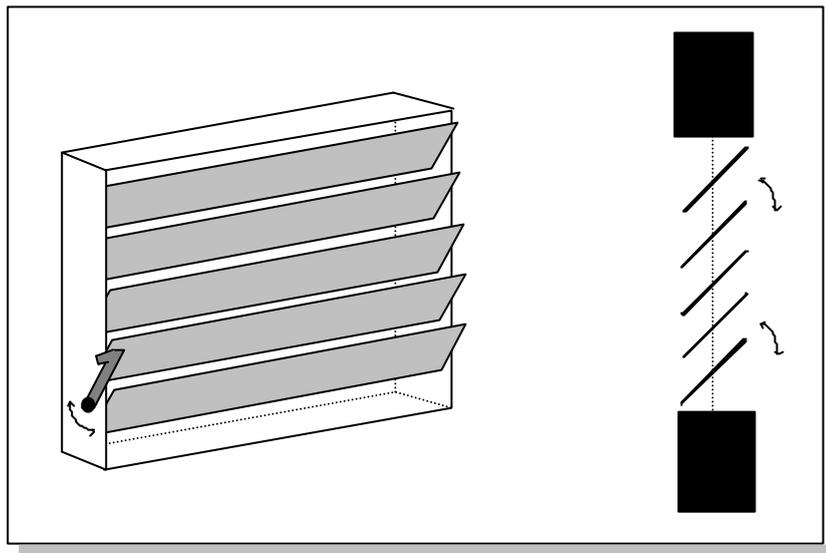


Fig. 70 : Système d'ouverture nacos

Pour ce type d'ouverture, en position intermédiaire, les coefficients de pression se retrouvent effectivement sur chacune des lames et leur utilisation est justifiée pour calculer la pression due au vent. La surface considérée pour l'ouverture est alors celle du maître couple.

### 3.4.3. Les grandes ouvertures intérieures horizontales :

Ce cas se présente par exemple dans les bâtiments comportant plusieurs étages. Le phénomène d'échange gravitationnel peut être important par exemple lorsque la zone se trouvant au-dessus de l'autre est refroidie. Très peu de publications sont consacrées à ce sujet. Seul Walton propose un modèle de ces ouvertures, qu'il n'intègre pas dans son modèle de simulation. Les corrélations disponibles sont issues de [Brown 62], étudiant des grandes ouvertures horizontales carrées et sont du type  $Nu = 0.0546 PrGr^{0.55} \left( \frac{L}{H} \right)^{0.33}$

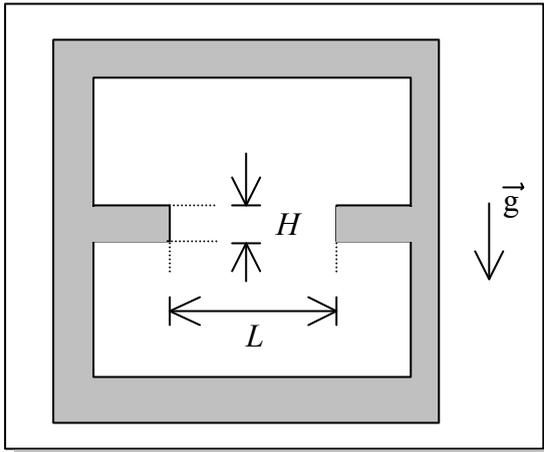


Fig. 71 : Grande ouverture horizontale

En raisonnant de la même manière que pour les ouvertures verticales, Walton propose de décomposer cette ouverture en deux petites ouvertures, l'une placée au-dessus, l'autre au-dessous du plan de séparation des zones thermiques, à une distance  $z$ . Comme le rapport  $(L/H)$  intervient dans la corrélation, la valeur de  $z$  varie avec chaque ouverture, caractérisée par le précédent rapport. L'auteur donne quelques valeurs de  $z$  correspondant à des rapports  $(L/H)$ , pour un  $Gr$  donné.

Cependant, la corrélation précédente prévoit que le flux doit être nul lorsque l'épaisseur  $H$  de l'ouverture tend vers  $0$ . Physiquement, cela n'est pas réaliste, car dans le cas où la zone du dessus est plus froide, il y aura certainement un débit. Notons pour terminer que la corrélation ne traite pas du cas où la zone haute est plus chaude, auquel cas le débit massique doit être nul.

Reprenant les conclusions de [Allard 92], nous terminerons ce paragraphe en décidant de ne pas intégrer les grandes ouvertures horizontales à notre outil, car aucun modèle performant ne permet à ce jour de les prendre en compte. Actuellement, face à ce problème concret se présentant dans un bâtiment à simuler, la solution est de ne pas considérer de zonage dans lequel la grande ouverture verticale sépare deux zones.

### 3.5. La résolution du système non linéaire en pression :

Avec les modèles choisis pour les grandes et petites ouvertures, l'écriture des bilans massiques de chacune des zones nous conduit à un système non linéaire, dont les inconnues sont les pressions de référence des zones, constituant un vecteur  $\mathbf{p} = (P_1, P_2, \dots)$ . Pour une zone indexée par  $i$ , le bilan massique que nous noterons  $f_i(\mathbf{p})$  doit être nul. Pour le bâtiment tout entier, en écrivant le système sous forme vectorielle, il nous faut résoudre  $\mathbf{f}(\mathbf{p}) = 0$ .

#### 3.5.1. La méthode de Newton Raphson :

Une revue des codes de simulation aéraulique montre que la méthode la plus utilisée pour résoudre ce système est celle de Newton-Raphson, assortie le plus souvent de certaines modifications [Feustel 92]. Cette méthode, exposée dans [Herrlin 92], montre que le système précédent se ramène à l'équation suivante :

$$\mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{p}^n - \frac{f(\mathbf{p}^n)}{J(\mathbf{p}^n)}$$

avec  $\mathbf{p}^n$  vecteur des pressions du pas de temps n, précédent  
 $\mathbf{p}^{n+1}$  vecteur des pressions inconnues au pas de temps n+1  
 $J(\mathbf{p}^n)$  Jacobien du système

La matrice jacobienne est formée des dérivées partielles des bilans de zones par rapport aux pressions de référence. Ainsi, par exemple pour un bâtiment comportant quatre zones, cette matrice s'écrit :

$$J(\mathbf{p}_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} & \frac{\partial f_1}{\partial p_3} & \frac{\partial f_1}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} & \frac{\partial f_2}{\partial p_3} & \frac{\partial f_2}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial p_1} & \frac{\partial f_3}{\partial p_2} & \frac{\partial f_3}{\partial p_3} & \frac{\partial f_3}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial p_1} & \frac{\partial f_4}{\partial p_2} & \frac{\partial f_4}{\partial p_3} & \frac{\partial f_4}{\partial p_4} \end{bmatrix}$$

L'équation précédente se met encore sous la forme  $J(\mathbf{p}^n) \mathbf{D}^n = -\mathbf{f}(\mathbf{p}^n)$

$\mathbf{D}^n = (\mathbf{p}^{n+1} - \mathbf{p}^n)$  est le vecteur des termes correctifs à appliquer aux pressions du pas de temps précédent pour trouver une approximation des pressions recherchées. En raison de la troncature des termes d'ordre supérieur à un dans le développement de  $\mathbf{f}(\mathbf{p}^n)$  pour obtenir l'équation de départ, les pressions trouvées en solvant ce système linéaire ne sont pas les solutions finales de notre problème. Elles n'en sont qu'une approximation et un traitement itératif est alors nécessaire pour atteindre la convergence vers la solution recherchée.

L'utilisation de cette méthode nécessite certains rappels dans le cas général et quelques remarques dans son application à notre système en pression :

La méthode ne converge de manière quadratique que lorsque l'estimé est proche de la solution. En se ramenant pour l'explication au cas à deux dimensions, autour de la solution, il est possible de délimiter un domaine ou disque de convergence. Si le point représentatif du vecteur initial est intérieur à ce disque (point A de la figure suivante), la convergence de la méthode est assurée.

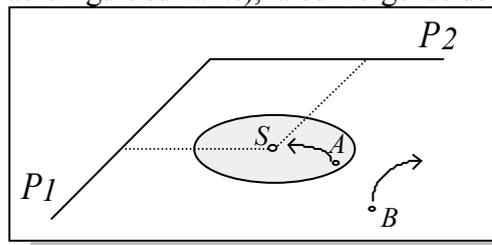


Fig. 72 : Disque de convergence de la méthode de Newton autour de la solution.

Dans notre cas, l'analyse physique du problème nous a conduit à considérer l'évolution des pressions comme une succession d'états permanents. Dans la majorité des publications exposant les méthodes utilisées pour résoudre le système aéraulique, le vecteur des pressions du pas de temps précédent est cependant utilisé pour initialiser la procédure itérative. A ce moment, en cas de variation importante des pressions entre deux pas de temps (à cause du vent ou des débits imposés par la ventilation mécanique), il se peut que le vecteur des pressions du pas de temps précédent soit en dehors du domaine de convergence de la méthode. La méthode de Newton diverge alors, ceci étant illustré par le point B sur la figure 72. Walton propose alors une méthode d'initialisation du vecteur des pressions [Walton 89a] : en linéarisant toutes les équations de débit (l'exposant de l'écoulement est pris égal à 1), le vecteur des pressions initiales considéré est solution d'un système linéaire qui caractérise le régime laminaire dans le bâtiment (mais intégrant les effets du vent et du tirage thermique).

L'intégration des grandes ouvertures au système en pression peut causer d'une part la divergence de la méthode et d'autre part des problèmes de rapidité de convergence. Disposée entre une zone et l'extérieur, une grande ouverture lie intuitivement de manière importante la pression intérieure et celle liée au vent. Entre deux pas de temps, la vitesse et la direction du vent pouvant évoluer de façon importante, nous retrouvons les remarques du paragraphe précédent. Une autre source de problèmes est la valeur de  $0.5$  à attribuer à l'exposant de l'écoulement pour les petites ouvertures équivalentes du modèle de Walton. Si le bilan massique est symétrique vis à vis des pressions et que les exposants sont tous égaux à  $0.5$ , la méthode de Newton diverge irrémédiablement [Herrlin 92]. Feustel précise que la méthode converge d'autant moins bien que le nombre d'exposants égaux à  $0.5$  croît [Feustel 89].

Ces problèmes de divergence de la méthode étant pour l'instant écartés, les grandes ouvertures peuvent aussi compromettre la rapidité de la convergence, ainsi que le remarquait Walton : "*... The reason for occasional slow convergence of Newton's method has not been found. It can occur with nothing more than a change in wind direction from what was a quadratically convergent case ...*" [Walton 84]. Nous allons apporter une explication. Pour cela, la figure 73 rappelle brièvement le fondement de la méthode de Newton, appliquée au cas à une dimension (dite méthode de la tangente). Le problème posé est celui de la racine  $x_R$  de la fonction  $f(x)$  tracée.

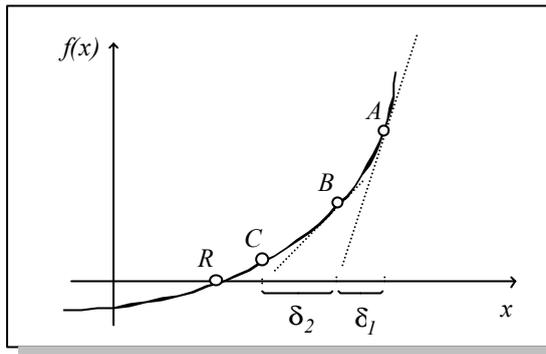


Fig. 73 : Méthode de la tangente

Au voisinage du point de départ  $A$ , la méthode assimile la courbe de  $f(x)$  à sa dérivée (tracée en pointillés). L'abscisse du point  $B$  est ainsi trouvée, en soustrayant à  $x_A$  le terme correctif, qui a pour valeur  $\delta_1$ . La procédure est répétée jusqu'à atteindre  $R$ .

Ce préliminaire étant effectué, il est par ailleurs établi qu'à travers une grande ouverture, une faible différence de pression engendre des débits massiques importants. Pour les zones concernées, les dérivées partielles des bilans massiques ont donc des valeurs numériques importantes (par rapport au cas ne comportant que des petites ouvertures). En considération de la figure 73, cela revient à incliner dans le sens de la verticale les tangentes (en pointillés) aux différents points  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ... . En conséquence, l'amplitude des termes correctifs successifs  $\delta$  est faible. Dans ces conditions, un nombre important d'itérations est alors nécessaire pour parvenir à la solution. De plus, pour un bâtiment présentant plusieurs zones séparées par des grandes ouvertures, il existe ainsi plusieurs directions dans lesquelles la convergence est lente. Entre deux pas de temps, la distance entre les vecteurs de pressions est fonction de l'évolution des perturbations amenées par les sollicitations. Le nombre d'itérations peut donc d'une part être très important et évoluer notablement d'un pas de temps sur l'autre.

### 3.5.2. Les améliorations rencontrées

Les méthodes de promotion de la convergence sont alors basées sur la détermination d'un coefficient  $\lambda$  de sur ou sous relaxation, intervenant de la manière suivante :

$$J(\mathbf{p}^n) \mathbf{D}^n = -\lambda \mathbf{f}(\mathbf{p}^n)$$

Dans les codes de calcul, la première méthode rencontrée est celle des coefficients de relaxation extrapolés. Cette méthode utilise tout d'abord deux itérations de la méthode de Newton Raphson, mais diffère ensuite. En effet, au départ de  $\mathbf{p}^{n-1}$ ,  $\mathbf{p}^n$  et  $\mathbf{p}^{n+1}$ , il est possible d'extrapoler un vecteur  $\mathbf{p}^{ext}$  qui va constituer un vecteur d'initialisation des itérations. Pour l'une des composantes de ce vecteur et en omettant l'indice de la zone concernée, la nouvelle pression d'initialisation est calculée de la façon suivante :

$$P^{ext} = P^{n+1} + \frac{P^{n+1} - P^n}{\left( \frac{P^n - P^{n-1}}{P^{n+1} - P^n} \right) - 1}$$

Cette méthode conduit à autant de coefficients de relaxation que de noeuds de pression, c'est à dire de zones.

La seconde méthode optimise à chaque itération la valeur des coefficients de relaxation à utiliser. Le problème de la détermination de la racine de  $\mathbf{f}(\mathbf{p})$  est ramené à celui de la minimisation de  $G(\mathbf{p})$ ,  $G(\mathbf{p})$  se définissant comme suit :

$$G(\mathbf{p}) = \mathbf{f}^t(\mathbf{p}) \mathbf{f}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n f_i^2(P_1, P_2, \dots, P_n)$$

$n$  étant la dimension du vecteur  $\mathbf{p}$ ,  $G(\mathbf{p})$  possède un minimum qui est aussi racine de  $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ . Le vecteur suivant,  $\mathbf{grad} G(\mathbf{p}) = (\frac{\partial G}{\partial p_1}, \frac{\partial G}{\partial p_2}, \dots, \frac{\partial G}{\partial p_n})$ , permet de déterminer la direction dans laquelle  $G(\mathbf{p})$  diminue le plus rapidement.  $G(\mathbf{p})$  peut par ailleurs s'exprimer comme une fonction de  $\lambda$ , dont l'expression analytique n'est pas connue. Il est cependant possible de la calculer pour certaines valeurs de  $\lambda$ , par exemple 0, 0.5 et 1. Au départ de ces points, une interpolation polynomiale permet de trouver la valeur de  $\lambda$  minimisant  $G$ .

Les tests montrent qu'au niveau du temps de calcul, les deux méthodes améliorées (extrapolation et optimisation) convergent plus rapidement que celle de Newton. Sur les cas traités, le temps calcul est d'environ deux ou trois fois moindre [Herrlin 92]. Walton souligne que les temps de calcul deviennent très pénalisants lorsque le nombre de zones augmente et que la taille des grandes ouvertures intérieures est du même ordre que celles extérieures [Walton 84]. Le problème du choix entre les deux méthodes de Newton améliorées n'est pas évident. Si l'optimisation amène un gain d'environ 46 % du nombre d'itérations, cet avantage est annulé par le temps nécessaire à la détermination du minimum évoqué. Si le temps calcul est équivalent, l'utilisation de la méthode optimisée est plus sécurisante vis à vis des problèmes de convergence survenant fréquemment avec la méthode de Newton Raphson et parfois avec celle extrapolée. Pour cette raison, c'est la méthode dite optimisée qui est conseillée par [Herrlin 92].

### 3.5.3. Quels choix et quels résultats ? :

Dans le cas réel de la simulation intégrant de grandes ouvertures et présentant des sollicitations fluctuantes, aucune méthode ne conduit indiscutablement à la convergence avec un nombre d'itérations raisonnable. Aussi, en plus ou en place des améliorations précédentes, les codes de calcul aérauliques sont souvent émaillés de corrections diverses pour tenter, avec plus ou moins de succès, de faire converger le système ou d'améliorer les temps de calcul.

- La première démarche utilisée conduit à la relaxation systématique. Un coefficient de sous relaxation de 0.5 est alors employé, permettant de parer à des oscillations en cas de divergence du système de départ, mais ralentissant notablement la convergence. Bien que cela ne soit pas

démonstré, il est admis que cette méthode permet la convergence du système aéraulique en pression, au départ des pressions du pas de temps précédent, avec cependant des cas conduisant à un nombre d'itérations important.

- Certains codes de calcul, tels *ESP* [Clarke 85], en plus de la correction précédente, proposent de borner chacun des termes correctifs. Les remarques précédentes valent aussi dans ce cas.

- Dans le cas de différences de pression très faibles, le calcul des termes du Jacobien peut poser problème, la dérivée partielle n'étant pas mathématiquement définie lorsque l'écart de pression tend vers 0. Numériquement, le terme correspondant dans le Jacobien peut dans ces conditions excéder le format représenté en machine. Une méthode pour éviter ce problème est de linéariser au voisinage de 0 la relation débit pression, en considérant l'écoulement comme laminaire (la valeur unité est attribuée à l'exposant). Le calcul de la dérivée partielle ne pose alors plus de problème, la valeur courante de la pression résiduelle (en deçà de laquelle la linéarisation est effectuée) est  $10^{-5}$  Pa. Notons qu'en toute rigueur, cette linéarisation d'une partie de la courbe débit pression introduit une discontinuité de la dérivée partielle (du débit et donc du bilan massique) et constitue théoriquement une cause de mise en défaut de la convergence. De même que [Walton 89a], les tests effectués pour différentes valeurs de la pression résiduelle n'ont pas posé de problème.

- Une autre correction, proposée par Clarke, est intégrée pour améliorer la rapidité de convergence lors de la prise en compte des grandes ouvertures. L'idée est de résoudre tout d'abord un système dans lequel la surface des grandes ouvertures n'est qu'une fraction de leur valeur réelle. Les pressions alors trouvées servent ensuite de pressions initiales pour un second système dans lequel la surface des grandes ouvertures est par exemple doublée par rapport au cas précédent. Le processus se répète alors jusqu'à ce que la taille des ouvertures atteigne celle désirée [Clarke 85].

Dans notre travail de thèse, nous avons mis en oeuvre les quatre points précédents. Au vu du nombre de simulations effectuées à ce jour, le problème qui peut survenir est celui de la lenteur de convergence, cas qui peut se produire lorsque le bâtiment possède des zones et des grandes ouvertures en nombre élevé, et que d'importantes perturbations sont appliquées. Ces perturbations sont les variations des débits de ventilation imposés, du régime des vents ou encore la mise en route de systèmes de traitement d'air. Une illustration de cet aspect est donnée au chapitre V, au paragraphe concernant les tests du module aéraulique.

### 3.6. Aspects informatiques du modèle aéraulique

Lors de l'introduction du modèle en pression, §3.2, il avait été question du découplage thermo-aéraulique. Pour un pas de temps donné, les valeurs connues sont celles des pressions de référence de chacune des zones du pas de temps précédent et d'une approximation des températures au pas de temps considéré. Reprenant alors la figure 60 et détaillant sensiblement les variables d'entrée et de sortie de chacun des modules, nous avons :

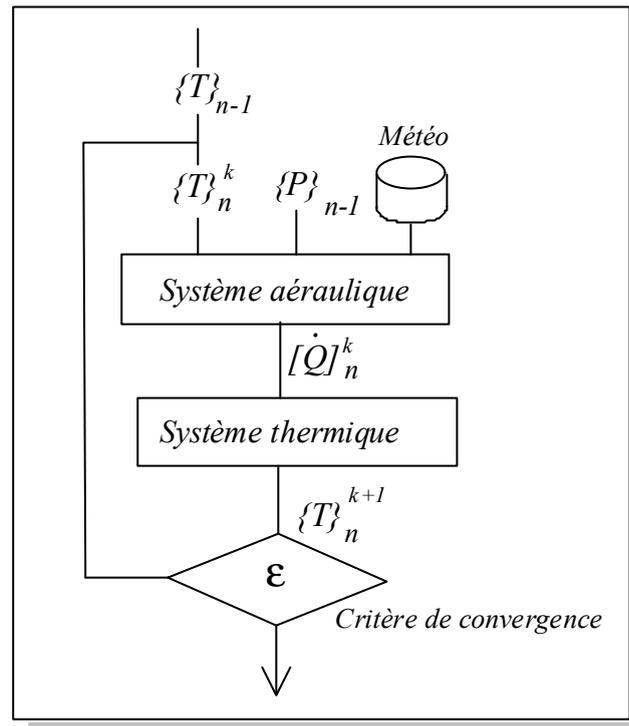


Fig. 74 : Le système thermo aéraulique

- avec  $\{T\}_n$  températures au pas de temps  $n$   
 $\{T\}^k$  températures estimées à l'itération  $k$   
 $\{P\}$  pressions de références des zones  
 $[\dot{Q}]$  débits massiques interzones

#### 3.6.1. Les algorithmes du modèle :

Nous ne nous intéressons maintenant qu'à la première partie de l'algorithme précédent. Compte tenu de la méthode utilisée, (Newton Raphson améliorée), la résolution du système non linéaire se ramène à la résolution itérative du système linéaire  $[J] (D) = (-f)$ , jusqu'à convergence des termes résiduels de bilan massique.

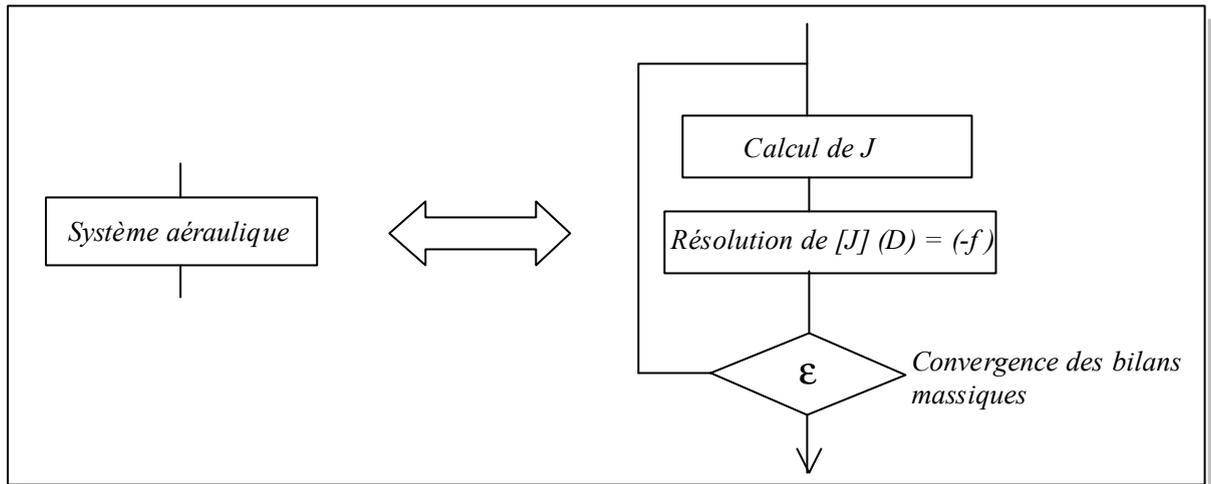


Fig. 75 : La résolution du système non linéaire en pression

La résolution de l'équation matricielle linéaire nécessite le calcul préalable du Jacobien et des termes résiduels de bilan. A chaque pas de temps, il faut tout d'abord calculer les coefficients de pression sur chaque façade extérieure du bâtiment, de façon à déterminer les pressions de référence intérieures. Il est alors possible de déterminer les débits à travers chacune des ouvertures, débits qui se combinent pour former la matrice des débits massiques interzones. L'organigramme de la figure 76 suivant explicite l'enchaînement des calculs précédents :

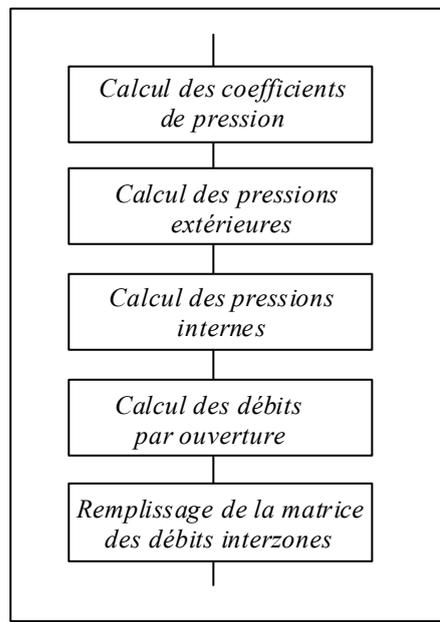


Fig 76 : Détail du calcul des débits pour un pas de temps donné

### 3.6.2. Aspects numériques de la résolution du système :

• En utilisant une procédure de résolution de système linéaire (pour  $[J] (D) = -f$ ), la résolution du système en pression nécessite le calcul des dérivées partielles des bilans pour le remplissage du Jacobien. La méthode que nous avons choisie tire parti de la connaissance de l'expression analytique des débits et donc de leurs dérivées. En effet, le bilan s'écrivant comme une somme de termes du type  $k \Delta P^n$  et de termes constants liés à la VMC, les dérivées partielles peuvent être calculées. Par exemple, considérons le bilan massique de la zone indiquée par  $i$ , séparée de la zone  $j$  par une petite ouverture. Avec les notations précédentes, le terme  $[i, j]$  de la matrice jacobienne est :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial p_j} &= \frac{\partial}{\partial p_j} \left( \sum k (p_j - p_i)^n + \dot{Q}_{vmc} \right) = -k n (\Delta P)^{n-1} \\ &= -n \frac{k \Delta P^n}{|\Delta P|} \end{aligned}$$

La dernière égalité fait apparaître au numérateur un terme évalué à l'itération précédente et permet de remplacer une élévation à la puissance coûteuse en temps calcul par une simple division. Nous avons vu que pour un écart de pression très faible, la dérivée n'étant pas définie, nous linéarisons l'expression du débit et le terme du Jacobien se ramène alors à  $-k$ .

L'autre méthode de calcul de la dérivée partielle est numérique. En un point  $p_{j0}$ , on a  $\left. \frac{\partial f_i}{\partial p_j} \right|_{p_{j0}} = \frac{f_i(p_{j0} + h) - f_i(p_{j0})}{h}$ ,  $h$  étant un incrément de pression suffisamment faible. Dans ces conditions, le calcul de la dérivée peut être faussé par les arrondis du compilateur et cette méthode doit être évitée [Press 88].

• La résolution du système en pression peut se faire en développant une procédure particulière de résolution d'un système non linéaire. Le problème qui se pose est celui du passage des fonctions à la procédure. Il est alors possible de tirer avantageusement parti d'une particularité des langages de programmation tels que le Pascal ou le C, permettant de passer en paramètre une fonction, en utilisant un pointeur. La revue des codes de simulation aérauliques, souligne à cet égard le fait que le logiciel *AIRNET* [Walton 89b], développé en langage C comme *CODYRUN*, utilise cette particularité. L'avantage est bien sûr de pouvoir utiliser cette procédure une fois pour toutes dans d'autres codes de calcul, quel que soit le type des équations formant le système. L'exemple suivant illustre la démarche.

$$\text{Soit à résoudre} \quad \begin{cases} f(x,y) = 0 \\ g(x,y) = 0 \end{cases}$$

La procédure de résolution sera une fonction que nous nommerons par exemple *ResoudSnl*, qui admettra comme paramètres d'entrées les adresses de *f* et *g*, soit *&f* et *&g* en langage C. L'appel de la procédure de résolution sera alors

$$\text{void ResoudSnl}( \&f, \&g, \dots )$$

Signalons que la procédure se devant de pouvoir résoudre le problème quelle que soit la dimension du système, il y a intérêt à ne pas passer les adresses une à une, mais à passer un tableau dynamique des adresses des fonctions et la dimension du système.

### 3.7. Conclusion :

Dans un souci de cohérence des niveaux de modèles, la prise en compte du caractère multizone de l'habitat s'accompagne d'un calcul détaillé des débits aérauliques. Ce chapitre a montré la diversité des approches rencontrées et explicité les raisons nous ayant conduit au choix d'un modèle en pression. Malgré les restrictions inhérentes à ce choix, un traitement homogène des grandes et petites ouvertures est en effet réalisable, mais fait alors apparaître certaines difficultés numériques que nous avons explicitées.

Avec le chapitre précédent traitant du modèle hygro-thermique, nous sommes en possession de tous les éléments pour mettre en place notre code de simulation. En plus de l'organisation, rendue complexe en raison du caractère multimodèle et la prise en compte simultanée des tranferts hygro-thermiques et aérauliques, le chapitre suivant détaille la description du bâtiment, étape nécessaire à un outil de conception.

# **Chapitre 4 : Architecture informatique de *CODYRUN***



Chapitre 4 : Architecture informatique de CODYRUN .....	147
4.1. Introduction.....	150
4.2. Le cahier des charges informatique : .....	150
4.3. La description hiérarchique du bâtiment : .....	153
4.3.1. Les concepts : .....	154
4.3.2. Les composants intégrés : .....	155
4.3.3. L'organisation des données : .....	157
4.3.4. La localisation des informations de type modèle : .....	159
4.3.5. Les fenêtres de saisie : .....	161
4.3.6. Perspectives d'évolution de l'interface utilisateur : .....	164
4.3.6.1. Une amélioration à court terme : .....	164
4.3.6.2. L'assemblage graphique : .....	164
4.4. Organisation du module thermique : .....	165
4.4.1. La structure de noeuds : .....	165
4.4.1.1. Composition : .....	166
4.4.1.2. Intérêt présent et futur de cette structure : .....	169
4.4.2. L'organisation des objets liés au calcul : .....	170
4.5. Organisation du module aéraulique : .....	172
4.5.1. Les composants et leur description : .....	172
4.5.2. L'organisation des calculs : .....	173
4.5.3. Détail du calcul des pressions de référence : .....	174
4.6. Organisation du module hydrique : .....	176
4.7. Le bandeau de menu de l'application : .....	177
4.8. Conclusion : .....	181

## 4.1. Introduction

Les deux chapitres précédents nous ont donné les moyens de construire des modèles conceptuels de certains systèmes ou sous-systèmes. Ainsi, le modèle thermique du bâtiment est constitué de l'assemblage des modèles de zones, eux mêmes obtenus en considérant l'ensemble des équations de bilan des noeuds de discrétisation de la zone. Le modèle aéraulique du bâtiment passe par la détermination des pressions de référence de chacune des zones. Le chapitre I faisait état du passage d'un système à un modèle à l'aide d'un code de modélisation. Nous l'avons traduit par un code de programmation, dont nous allons évoquer ici les principaux aspects. En plus des structures de données et de l'organisation des traitements, ce chapitre permettra d'aborder l'interface de *CODYRUN*.

## 4.2. Le cahier des charges informatique :

L'idée générale est celle d'un logiciel détaillé de simulation thermo-aéraulique de bâtiment. Le cahier des charges présente plusieurs volets très différents qu'il faut faire cohabiter dans un même outil. Concernant le cahier des charges lié à la modélisation physique, le premier aspect est celui d'une structure multi-modèle. L'utilisateur thermicien, face à un phénomène donné pour lequel plusieurs modélisations sont possibles, doit pouvoir recourir à un modèle différent sans autre problème que celui de son choix. Vis à vis de l'analyse, il s'agit alors tout d'abord d'uniformiser syntaxiquement les équations provenant des différents modèles. Le formalisme matriciel se prête très bien au problème. L'application sélective des modèles, autre point original, implique un traitement des phénomènes en regard des modèles choisis pour les entités concernées. Le caractère modulaire et très structuré du projet devient alors une nécessité.

Les considérations précédentes concernent plutôt un outil de recherche, utilisable pratiquement exclusivement en laboratoire. Pour en faire un outil de conception, plusieurs conditions devaient alors par ailleurs être réunies :

La première contrainte concerne la machine cible de l'application. Dans le domaine des machines de bureau effectivement rencontrées chez les concepteurs, notre choix devait donc se faire entre les environnements *MACINTOSH* et *IBM PC*. Cette dernière plate forme a été choisie car constituant

l'équipement majoritaire des bureaux d'études. Par ailleurs, l'expérience du laboratoire sur cette gamme de machine, acquise notamment lors du développement des logiciels *CODYBA* [Brau 92] et *SETIS* [Robin 91b], a été déterminante.

La seconde nécessité pour l'outil est celle de disposer d'une interface utilisateur performante, dans le sens de la convivialité. A ce niveau, deux possibilités de développement nous étaient offertes, avec une interface spécifique ou l'intégration de l'application à l'environnement *Windows*. Le premier argument en faveur de cette dernière solution est d'ordre technique et a trait à la gestion mémoire assurée par cet environnement [Vasseur 91]. En effet, le seul modèle thermique, au travers des vecteurs et matrices associés à une zone, laisse entrevoir des besoins mémoire importants pour l'application. Le calcul de l'encombrement mémoire nécessaire au stockage des objets d'une zone est aisément réalisable. Pour une zone dont la dimension du vecteur d'état est  $n$ , les éléments des matrices et vecteurs de la décomposition de l'équation d'état sont des réels, codés en machine avec quatre octets (sur une machine type PC). Au total, ces réels sont au nombre de  $10n^2 + 13n$ . Pour un volume d'air, un vitrage et six parois environnantes pour lesquelles le modèle conductif ne comporte que deux noeuds,  $n$  vaut déjà 16 et la place mémoire utilisée pour le seul stockage des objets avoisine alors les 10 kilos octets. La mémoire nécessaire variant avec le carré du nombre de noeuds dans une zone, des limitations quand au nombre de noeuds et/ou de zones sont prévisibles, si le système ne gère que les 640 kilos octets du DOS. Le gestionnaire de mémoire intégré à *Windows* permet tout d'abord la gestion (et l'allocation) de la mémoire au-delà de la limite des 640 kilos octets du *DOS*. Ensuite, si cette capacité mémoire venait à faire défaut, le gestionnaire est capable d'utiliser une partie du disque dur comme de la mémoire vive, au détriment cependant du temps de fonctionnement.

L'autre aspect conduisant au choix de *Windows* est celui de la tendance générale du marché des produits logiciels, favorisant particulièrement cet environnement au détriment d'autres systèmes (*OS/2*). Doté d'une ergonomie qui en fait la référence sur les compatibles PC, *Windows* est aussi un intégrateur en ce qu'il permet l'échange de données entre documents au travers de standards, tels que *OLE* et *DDE*. [Petzold 91]

A la date de notre démarrage de la programmation (Décembre 1991), le seul langage permettant le développement d'applications sous *Windows* était le C, livré par Microsoft sous deux packages différents (*Compilateur C 6.0* et *Software Development Kit* ou *Quick C for Windows*). Notre

choix de *Quick C for Windows* a été facilité par [Heller 91] et [Urban 91], mettant en avant l'excellente intégration de ce produit, tournant entièrement sous *Windows*.

Le choix alors implicite du langage C amène certains commentaires importants. Langage structuré dit de bas niveau, il s'accommode parfaitement des préceptes d'une programmation claire, lisible et structurée. La manipulation des pointeurs est l'un de ses avantages, cette manipulation demandant cependant au programmeur une plus grande maîtrise de son code que lors de la mise en oeuvre d'autres langages. Issu du domaine restrictif des domaines d'exploitation, le C a effectué une percée très nette dans les outils de développement, principalement en raison d'une portabilité sans égal [Kernighan 89]. En terme d'évolutivité, le tandem C / *Windows* est intéressant, dans un premier temps en raison de la compatibilité avec de nouveaux outils orientés objet, tels C ++ *pour Windows*. L'utilisation de ce nouveau concept a d'ailleurs fait apparaître des aspects intéressants dans le domaine de l'informatique appliquée aux bâtiments [Wright 92]. La pérennité du développement entrepris, assurée vis à vis du code de calcul car écrit en C *pur* (c'est à dire norme ANSI), devrait aussi être vérifiée vis à vis du volumineux code lié à l'interface utilisateur. En effet, La compatibilité source est acquise pour les futures versions de *Windows* et annoncée pour des environnements tels *Windows NT* (ouvrant ainsi à l'application le champ des mini ordinateurs et stations de travail). L'avantage est de taille, la part du code dédiée à l'interface avoisinant couramment les 70 %. Pour terminer, signalons que toute la convivialité si habituelle dans l'environnement *Windows* se paie par le programmeur qui doit produire un code à la fois volumineux (ce malgré les améliorations apportées par les nouveaux outils) et demandant une rigueur draconienne.

*Fig 77 : Quelques unes des ... 38 000 lignes de code de CODYRUN*

Pour présenter l'architecture de *CODYRUN*, une démarche possible est alors de l'analyser selon les deux points de vue principaux, l'un physique et l'autre lié aux aspects utilisateurs. Compte tenu de l'inter pénétration des deux domaines précédents dans notre outil, nous avons préféré présenter dans

chacun des modules (thermique, hydrique et aéraulique) une sélection de certains aspects menant à une compréhension globale de l'ensemble.

La décomposition fonctionnelle de *CODYRUN* fait apparaître trois modules principaux, à savoir *Description*, *Simulation* et *Exploitation*. Un synoptique des traitements est donné par la figure 78, en considérant les fichiers générés par chaque étape. Au départ d'un fichier de données météorologiques du site et de la description du bâtiment considéré, la simulation fournit un fichier des résultats. Ce fichier peut alors donner lieu à différentes exploitations, telles que le tracé de courbes, l'édition de tableaux ou certains tracés particuliers (diagramme de confort, héliodons, ...).

*Fig 78 : Synoptique général de CODYRUN*

### **4.3. La description hiérarchique du bâtiment :**

La simulation du bâtiment nécessitant sa description préalable, il nous a fallu imaginer une description conceptuelle de l'objet bâtiment. Le bâtiment étant a priori quelconque, le caractère multizone de l'outil envisagé complique sensiblement la tâche. La démarche repose alors sur une vision modulaire du bâtiment. Nous supposons que ce dernier résulte de l'assemblage d'éléments autonomes dont les couplages déterminent le comportement global de l'ensemble. Avec cette vision systémique de l'objet bâtiment, si les deux chapitres précédents se ramènent à *comment résoudre et coupler les systèmes*, l'essentiel de cette partie peut se résumer par la question suivante : *comment décrire ou encore décomposer le bâtiment ?*.

Une réponse étant apportée dans ce chapitre (du moins au regard de nos besoins !), ce paragraphe se termine par les fenêtres de l'application (ou écrans de saisie), qui sont la traduction informatique de la description conceptuelle proposée.

#### **4.3.1. Les concepts :**

L'application de l'analyse systémique au système bâtiment nous a amené à introduire les concepts de *zone* et de *composant*. Rappelons que le concept de *zone*, constitué d'un volume d'air isotherme et des parois et vitrages adjacents, est né de la prise en compte de la finalité thermique du bâtiment. Il avait alors été remarqué que la définition choisie pour l'entité zone en faisait des entités non disjointes, certains types de composants pouvant appartenir simultanément à deux zones. Dans le but de faciliter la description, il nous est apparu opportun de définir l'intersection de deux zones non disjointes (ou lieu de recouvrement des modèles locaux) comme une *inter ambiance*. A ce moment, pour un bâtiment, la figure 79 juxtapose les deux décompositions successives, l'une systémique, héritée du chapitre I, et l'autre enrichie du nouveau concept :

*Fig. 79 : Descriptions systémique et conceptuelle d'un bâtiment*

Dans la première décomposition, il est important de noter que les relations entre les composants et les zones sont de type fonctionnel (ou équationnel). Une relation fonctionnelle traduit l'imbrication des équations liées au composant dans le système d'équations régissant le système thermique *zone*. Le modèle thermique d'une zone a été établi au chapitre II. Ce type de décomposition est à l'évidence à l'usage exclusif du modélisateur. Dans la seconde décomposition, les relations, symbolisées par des pointillés, traduisent l'appartenance du composant à la *zone* ou à l' *inter ambiance*. Dénuée (du moins en apparence) de tout contenu lié à la modélisation physique, ce type de relation se prête très bien à la description du bâtiment. L'expérience recueillie auprès des premiers utilisateurs de *CODYRUN* nous amène cependant à préciser que l'inter ambiance, entité conceptuelle, est à différencier des composants de cette *inter ambiance*. Ainsi, pour deux zones séparées physiquement par un mur, le mur appartient à l' *inter ambiance* de séparation et ne constitue pas cette *inter ambiance*.

Les entités *zones* et *inter ambiances* permettent de construire le squelette du bâtiment, sur lequel tous les éléments constitutifs (parois, vitrages, ...) vont être greffés. Ils porteront alors le nom de *composants*. Une relation d'appartenance stricte intervient entre un composant et l'entité zone ou inter ambiance. Ainsi, si un vitrage sera un composant d'inter ambiance, un système de traitement d'air sera par contre attaché à une zone. Nous sommes donc en présence de la structure hiérarchique suivante :

Fig. 80 : Structure hiérarchique de description d'un bâtiment.

Pour un même bâtiment, plusieurs descriptions peuvent être données, le paramètre déterminant étant le zonage. Ce dernier mot regroupe tous les aspects de la décomposition du bâtiment en zones thermiques : il s'agit bien sûr du nombre de zones choisi et de la définition de chacune des zones. L'information du nombre de zones constitue pour le bâtiment un paramètre de sa modélisation.

Par ailleurs, l'extérieur du bâtiment est considéré comme une zone vis à vis de notre description.

#### 4.3.2. Les composants intégrés :

Un composant sera une entité identifiable par un libellé. Pour compléter un bâtiment préalablement décrit par ses zones et inter ambiances, le concepteur dispose des éléments listés dans le tableau suivant :

Composants de zone	Composants d'inter ambiance
paroi interne	paroi de séparation
système de traitement d'air	terre plein
charge interne	paroi sur vide sanitaire
Bouche de ventilation (VMC)	paroi sur terre plein
	vitrage
	grande ouverture
	petite ouverture
	débit connu

Une paroi interne est baignée sur chacune de ses faces par l'air d'une même zone. Elle n'intervient donc qu'au niveau de l'inertie. Ce type de paroi peut aussi être utilisé pour prendre en compte la présence du mobilier.

Un système de traitement d'air comporte une partie sensible et latente, chacune des deux parties pouvant être désactivée. La fenêtre de description de ce composant est présentée au chapitre V, paragraphe 5.4.3.1. Pour la partie sensible, les principales grandeurs associées sont les températures de consigne et les puissances disponibles. Des profils de puissance peuvent être définis, ainsi qu'un

mode de répartition de la puissance de chauffage selon différents modes (convectifs et radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde).

Une charge interne, comme pour le traitement d'air, possède une composante sensible et latente, avec un profil horaire et un mode de répartition de la puissance sensible.

Une bouche de ventilation correspond à une entrée d'air extérieur ou à une sortie de l'air intérieur. Le volume horaire doit être spécifié. Dans l'état de *CODYRUN*, le débit est considéré comme indépendant des pressions. Un profil horaire peut moduler le débit.

Une paroi de séparation est tout d'abord caractérisée par sa surface et sa constitution. Les caractéristiques radiatives de chacune des faces de la paroi sont ensuite à définir. Le terre plein est une paroi particulière (parce que terminale) appartenant à une inter ambiance avec le sol. Il est nécessaire de décrire une condition aux limites (profondeur de flux nul), de même que pour la paroi sur vide sanitaire [CSTB 90]. La paroi sur terre plein a été particularisée car elle est accolée en série avec le terre plein.

Un composant de type vitrage est caractérisé par sa surface, les caractéristiques optiques des verres constituants et un profil de facteur solaire.

Grandes et petites ouvertures sont des composants qui interviennent lors du calcul détaillé des débits. Toujours dans les composants liés à l'aéraulique, dans le cas de l'utilisation d'un modèle aéraulique où les débits sont supposés connus, des composants de type débit connu (et éventuellement des profils horaires) sont alors renseignés.

Utilisant alors les concepts de la description pour le bizona de la figure 81, nous avons la décomposition (partielle) suivante :

*Fig. 81 : Eléments de description d'un  
bizona*

Zones : *zone Nord et zone Sud*

Composants de l'inter ambiance Sud - Ext :

Inter ambiances

la paroi hachurée

avec le sol

le vitrage

de séparation verticale

Composant dans zone Nord.

extérieures

charge interne *éclairage*

Sur l'exemple précédent, il est clair que les inter ambiances assurent des rôles différents. Pour une zone donnée, certaines la séparent de l'extérieur, d'une autre zone ou encore du sol. A une inter ambiance correspond donc un type particulier. Pour être complet, les inter ambiances de séparation seront qualifiées d'horizontales ou de verticales, cette distinction étant nécessaire vis à vis de l'aéroulque.

Signalons qu'en l'état actuel du logiciel, les masques proches ou lointains ne sont pas intégrés. Leur prise en compte présentant plus une contrainte de temps (de développement du code associé) qu'une réelle difficulté, nous nous sommes contentés pour chacun des vitrages d'un profil de facteur solaire. Un masque lointain sera sensiblement différent des autres composants, car il est plus naturel de l'attacher au bâtiment. En découpant l'environnement du bâtiment en secteurs angulaires, il suffit alors de saisir la hauteur du masque lointain. Un masque proche sera un composant d'inter ambiance. Nous prévoyons d'intégrer ultérieurement une bibliothèque de masques types, à savoir joue, auvent, muret ... .

#### **4.3.3. L'organisation des données :**

La décomposition devant permettre de décrire un bâtiment quelconque, le problème de l'organisation des données doit être abordé. De manière tout d'abord indépendante, chacune des entités précédentes est organisée en structures. Une structure, que l'on retrouve parfois sous le vocable d'enregistrement, désigne une collection de champs d'information. Pour prendre l'exemple d'une zone, les champs associés se ramènent pour l'instant à un libellé (permettant de référencer la zone) et au volume. La structure zone sera donc constituée d'une chaîne de caractères et d'un entier. De

même, les champs d'information associés à une inter ambiance sont un libellé, un type, un azimut, une inclinaison et les numéros de zones se trouvant de part et d'autre.

<i>Bat</i> {	<i>Zone</i> {	<i>Inter ambiance</i> {
<i>nom de bâtiment</i>	<i>nom de zone</i>	<i>nom d'inter ambiance</i>
<i>nombre de zones</i>	<i>volume</i>	<i>type</i>
<i>angle de rotation</i>	<i>...}</i>	<i>azimut</i>
<i>type du site</i>		<i>inclinaison</i>
<i>....}</i>		<i>numéro de zone 1</i>
		<i>numéro de zone 2</i>
		<i>...}</i>

Le cas des composants est sensiblement différent. Si pour chacun d'entre eux se retrouve effectivement un libellé, un type et un élément d'appartenance (zone ou inter ambiance), la suite des informations est liée au type du composant et est surtout très différente d'un type de composant à un autre. Nous avons choisi d'avoir plusieurs structures pour les composants. La première va contenir les trois champs précédents (nom, type, élément d'appartenance) ainsi qu'un numéro qui servira à faire le lien avec la suite. Nous aurons ensuite une structure de données Paroi, une structure Vitrage, une autre Ouverture et finalement Charge Interne contenant pour chacune d'entre elles les champs associés.

```

Composant {
    nom de composant
    type de composant
    numéro d'élément d'appartenance
    numéro lien
    ...}

```

Chacune des structures ayant été abordée indépendamment, il est nécessaire de voir l'organisation de l'ensemble, pour former finalement la macro structure bâtiment. Cette organisation fait largement appel aux pointeurs. Certaines fonctions des langages tels que le PASCAL ou le C permettent

l'allocation dynamique, c'est à dire la réservation de place en mémoire, ce seulement au moment et en quantité nécessaire. Cette notion est à opposer aux tableaux statiques, alloués pendant toute la durée de l'exécution et de taille fixée à un certain maximum.

Cette zone mémoire pouvant contenir n'importe quel type de données, nous dirons qu'un pointeur peut pointer sur une entité de type quelconque. Parmi ces types de données, se retrouvent bien sûr les types prédéfinis du langage (entiers, chaînes de caractères, ...), mais aussi (et surtout !) les types définis par le programmeur, telles que les structures que nous avons précédemment définies. Vu le caractère multizone, il est nécessaire d'utiliser des pointeurs sur des tableaux contenant des structures.

En regroupant l'ensemble, considérons un bâtiment composé de 2 zones, de 3 inter ambiances, et 3 composants. Pour simplifier, les composants se partagent en 2 parois et 1 vitrage. La figure 82 illustre l'organisation des données alors obtenue.

*Fig. 82 : Organisation des données de description*

#### **4.3.4. La localisation des informations de type modèle :**

L'aspect multi-modèle du logiciel nous amène à implanter pour les phénomènes physiques suivants plusieurs modèles présentant différents niveaux de finesse :

- Transferts aérauliques
- Convection extérieure
- Convection intérieure
- Echanges radiatifs intérieurs de grande longueur d'onde
- Conduction

De plus, en regard de préoccupations liées au climat, nous désirons aussi intégrer plusieurs modèles de reconstitution de paramètres météorologiques (rayonnement diffus sur une surface quelconque et température du ciel). D'autre part, il est nécessaire de distribuer ces informations renseignant les modèles dans les structures précédentes, en raison d'un autre aspect original de *CODYRUN*, à savoir l'application sélective des modèles. Le tableau suivant explicite les choix qui ont été faits :

	<i>Bâtiment</i>	<i>Zone</i>	<i>Inter ambiance</i>	<i>Composants paroi et vitrage</i>
Zonage	x			
Transferts aérauliques	x			
Convection extérieure	x			
Paramètres météorologiques	x			
Convection intérieure		x		
Echanges radiatifs intérieurs		x		
Conduction				x

Tous les modèles se trouvant au niveau du bâtiment conservent actuellement un caractère global. Leur application ne peut donc être sélective. Par exemple, dans un bâtiment, il ne nous est pas apparu souhaitable de calculer pour une partie de ce bâtiment les débits d'une certaine manière et de les calculer en utilisant un autre modèle pour le reste du bâtiment. De même, nous avons choisi d'enclencher le même modèle des flux convectifs pour l'ensemble des éléments de l'enveloppe extérieure du bâtiment. La même démarche a été adoptée pour la reconstitution du rayonnement diffus et de la température du ciel.

Le modèle de la convection intérieure aurait pu se ramener au niveau d'une paroi. Les problèmes intéressant le thermicien du bâtiment étant le plus souvent liés au comportement thermique d'une zone donnée, nous avons décidé d'activer le même modèle pour l'ensemble des parois et vitrages intérieurs à une zone. Nous avons procédé de manière identique pour les échanges radiatifs intérieurs de grandes longueurs d'onde.

Nous avons choisi de ne pas affecter de modèles à l'entité inter ambiance.

Le modèle de plus bas niveau (au sens de notre structure de données) sur lequel il est possible d'agir est celui concernant la conduction dans une paroi.

Au niveau des autres composants (ouvertures, systèmes de traitement d'air, ...), l'accès n'est donné qu'aux paramètres du modèle intégré, de par son unicité. Par exemple, pour une petite ouverture, le

seul modèle intégré étant celui de l'équation de débit, les paramètres nécessaires à ce modèle se retrouvent au niveau de la fenêtre de description de ce composant.

Par rapport à l'existant présenté précédemment, un exemple d'ajout de modèle peut être celui de l'intégration d'un modèle débit-pression d'une bouche de ventilation. Dans ce cas, le choix modèle aéraulique de ce composant (en plus du modèle actuel imposant la connaissance du débit) serait effectué au niveau du composant.

#### **4.3.5. Les fenêtres de saisie :**

A la description conceptuelle et aux structures précédentes, correspond une description informatique du bâtiment. Considérons celui de la figure 81. La première fenêtre est celle du bâtiment.

*Fig. 83 : Fenêtre Bâtiment*

En plus des paramètres liés au bâtiment (nom, morphologie, ...) et à sa localisation (latitude, environnement, ...), le cadre intitulé *Entités Définies* propose un rappel des entités déjà saisies pour ce bâtiment.

Le nombre de zones, saisi lors de la création du bâtiment, constitue une donnée qu'il est ensuite impossible de modifier. En effet, le choix que nous avons fait est celui d'une description conditionnée par le zonage.

Le cadre correspondant aux *modèles* rattachés au bâtiment se trouve en bas de la fenêtre précédente. Chacun des boutons de couleur grise permet d'avoir accès à une fenêtre proposant un choix optionnel de modèles. En plus du bouton, un champ texte rappelle le modèle actuellement sélectionné (ou le modèle par défaut). Les boutons *Zones*, *Inter Ambiances* et *Composants* permettent de descendre dans les différents niveaux de l'arborescence du bâtiment. Les boutons *Annuler* et *Valider* sont utilisés lors des modifications intervenant sur un bâtiment existant ou lors de la création.

La seconde fenêtre de saisie concerne l'entité zone. Les seuls champs à renseigner concernent le libellé et le volume.

Fig. 84 : Fenêtre Zone

Comme cette zone est susceptible de contenir des composants, le cadre *Composants associés* propose un rappel des composants déjà saisis dans cette zone. De même que précédemment, nous retrouvons le cadre des modèles liés à l'entité zone et les boutons de navigation dans la structure de données. Tous les éléments d'un même type et d'un même niveau hiérarchique (les zones dans le cas présent) sont accessibles par les boutons *Précédent* (<) et *Suivant* (>).

Fig. 85 : Fenêtre Inter ambiance

La fenêtre précédente, figure 85, est celle des inter ambiances. En plus du type, il est nécessaire de spécifier, à l'aide des boîtes de liste, les zones séparées par l'inter ambiance. La gestion du bouton *Suivant* appelle un commentaire supplémentaire, valable aussi pour la prochaine fenêtre. En consultation, ce bouton permet l'accès à l'élément qui lui succède dans l'arborescence de la description. A la différence des zones dont le nombre est spécifié dans la fenêtre bâtiment, il est toujours possible d'ajouter à un bâtiment (complet ou en cours de description) une inter ambiance ou un composant. Pour cela, il suffit d'actionner le bouton *Suivant* jusqu'à la dernière entité. Le prochain appel à l'entité suivante (au travers du même bouton) propose une fenêtre vierge permettant la saisie d'une nouvelle entité.

Nous avons évoqué lors des composants l'organisation de l'information distribuée entre deux structures. Pour une paroi, le nom, le type et le numéro de l'élément d'appartenance sont contenus dans la structure composants. Le reste de l'information (surface, constitution, ...) est stocké au niveau de la structure des parois. Vis à vis de l'interface, cette distinction de provenance des informations n'apparaît pas et l'utilisateur est en présence d'une fenêtre composant globale, telle que celle ci :

The screenshot shows a software window titled "consultation ou modification d'un composant". At the top, there are two text boxes: "Libellé : Mur Sud" and "Appartenant à : Interambiance" with a dropdown menu showing "IA-ZoneSud-Ext". Below this is a "Type" section with a list of radio buttons: "Paroi interne", "Système de traitement d'air", "Charge interne", "Bouche de ventilation", "Paroi de séparation" (which is selected), "Paroi sur terre plein", "Terre plein", "Paroi sur vide", "Vitrage", "Grande ouverture", "Petite ouverture", "Débit connu", and "Masque". To the right of the "Type" section is a large area containing several buttons and text: "Surface : 12 m²", "Constitution ... Béton 12 cm", "Prop. radiatives ... Standard", "Modèle conductif ... R2C", and "Condition Limite". At the bottom of the window, there are navigation buttons: "<< Zone", "<< IA", "<<< Bâtiment", "<", and ">". Finally, at the very bottom, there are "Valider" and "Annuler" buttons.

Fig. 86 : Fenêtre Composant

Pour ne pas surcharger la fenêtre composants, nous avons choisi d'accéder à la constitution de la paroi, aux caractéristiques radiatives et aux modèles conductifs au travers de fenêtres dédiées. Face aux boutons permettant l'accès à ces fenêtres, sont disposés des champs de rappel des valeurs par défaut ou précédemment saisies.

Un autre exemple de cette fenêtre, cette fois pour un composant système de traitement d'air, est proposé en page 212.

#### 4.3.6. Perspectives d'évolution de l'interface utilisateur :

La description d'un bâtiment, au travers des fenêtres de saisie, nous est apparue satisfaisante. Cependant, diverses améliorations ou évolutions de l'interface sont souhaitables. Deux exemples en sont donnés ci-après.

##### 4.3.6.1. Une amélioration à court terme :

Avec l'offre de nouvelles plates-formes de développement tel *C++ / Windows*, (et leur compatibilité avec nos choix de départ), d'autres fonctionnalités sont envisageables, telle que l'adjonction au menu d'une barre d'outils. Il s'agit d'un ensemble d'icônes disposées en dessous du bandeau d'accueil (voir paragraphe 4.7) permettant un accès rapide à des fonctions utilisées fréquemment. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de ces icônes et des fonctions associées.

Opération effectuée :	Icône
Enregistrement	
Copie dans le presse papier	
Collage du presse papier	
Suppression	
Impression	

##### 4.3.6.2. L'assemblage graphique :

Il s'agit d'une méthode de description graphique d'un bâtiment, à l'aide d'une boîte à outils contenant les icônes des entités (zone, paroi, ...) qu'il est possible de composer. L'assemblage symbolique affranchit en particulier le concepteur de toutes les notions d'appartenance et permet une saisie beaucoup plus intuitive. Nécessitant une analyse plus fine et certainement un volume de développement important, nous reportons à une étape ultérieure cet aspect cependant très intéressant vis à vis des problèmes de conception, en ce qu'il permet de franchir un pas de plus vers le milieu professionnel. Des travaux dans ce sens sont proposés par [Drogemuler 93] ou [Moller 93].

Dans *CODYRUN*, une ébauche de cette possibilité est trouvée au travers d'un élément de menu (*Edition Visualiser*), permettant actuellement de visualiser l'arborescence de la structure de données du bâtiment.

## **4.4. Organisation du module thermique :**

### **4.4.1. La structure de noeuds :**

L'ensemble des structures précédentes constitue la base de données descriptive du bâtiment. Bien que contenant certaines informations liées aux modèles, elle ne permet pas de construire directement le modèle thermique, basé sur la discrétisation nodale des parois, vitrages et des volumes d'air. Le modèle thermique global est bien sûr constitué de l'ensemble des équations de bilan énergétique des noeuds de discrétisation. Le modèle thermique d'une zone, que l'on cherche à établir, est obtenu en ne conservant du système précédent que les équations des noeuds appartenant à une zone.

L'appartenance d'un noeud à une zone thermique doit être précisée, cette fois avec les nouveaux concepts de la description. Un noeud appartient à une zone tout d'abord si c'est un noeud du volume d'air de la zone considérée (le noeud d'air ou de température radiante moyenne). Par ailleurs, une autre condition est que ce noeud fasse partie du maillage d'une paroi ou d'un vitrage appartenant à une inter-ambiance intéressant la zone considérée. Pour une zone donnée, la fin du chapitre II (§2.4.6.2) sur le modèle hygro-thermique illustre la décomposition adoptée de l'équation d'évolution d'état d'une zone. Chacun des objets élémentaires (matrices et vecteurs) doit être rempli. Pour réaliser cette dernière opération le module thermique va générer une structure intermédiaire, dite structure de noeuds, qui comportera pour chaque noeud du maillage les informations nécessaires au remplissage.

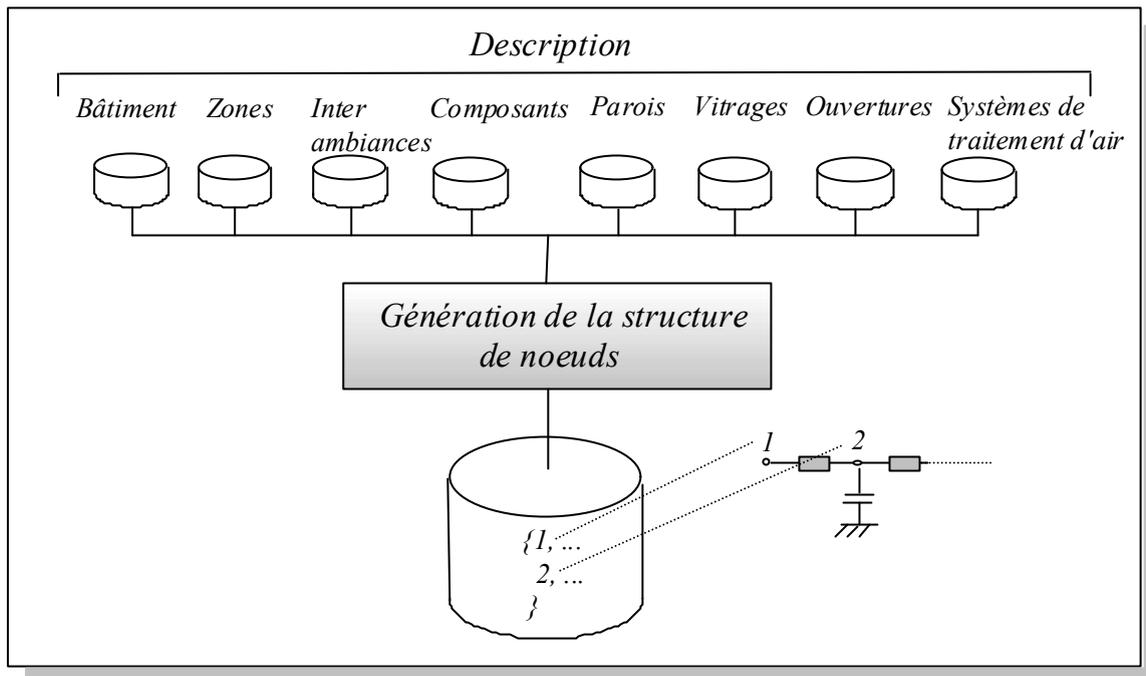


Fig. 87 : La génération du maillage nodal du problème thermique

La structure résultant de la figure 87 regroupe tous les noeuds issus de la discrétisation nodale du bâtiment. Leur nombre est de deux par zone (un noeud de température sèche d'air et un de température radiante moyenne) et par vitrage (hypothèse faite sur la conduction dans les vitrages). Pour chaque paroi, le nombre de noeuds, fonction du modèle choisi, est disponible dans la structure des parois. A un noeud, nous avons associé différents champs d'information formant ainsi une structure et que nous allons passer en revue.

#### 4.4.1.1. Composition :

Chaque noeud possédera tout d'abord un numéro absolu, incrémental, qui va d'ailleurs servir à indexer la structure.

Vis à vis des équations, les noeuds interviennent à des titres différents. Par exemple, un noeud de paroi va concerner la matrice  $A_{COND}$ , qui regroupe les termes liés à la conduction. Ce même noeud, en fonction de sa disposition, peut aussi concerner la matrice des conductances convectives linéarisées,  $A_{CVI}$ , s'il est en surface de la paroi et sur sa face intérieure à la zone. Sur la face extérieure d'une paroi d'enveloppe, le noeud de surface est concerné par les échanges radiatifs et convectifs avec l'extérieur. Il est donc nécessaire d'attribuer à chaque noeud un type, auquel nous rajoutons le qualificatif "absolu" (le type relatif sera défini plus en avant). Pour recenser ces types absolus, il nous

a suffit de considérer chaque objet issu de la décomposition de l'équation d'évolution et de nous poser la question suivante : *Quelle est la caractéristique des noeuds concernant le remplissage de cet objet ?*. Le tableau ci-dessous donne dans sa première colonne l'ensemble des types absolus utilisés et dans la deuxième un numéro de référence qui nous servira pour la figure suivante :

<i>Noeud ...</i>	<i>Type absolu</i>
<i>... de surface extérieur de paroi opaque extérieure</i>	<i>1</i>
<i>... de surface intérieur de paroi opaque extérieure</i>	<i>2</i>
<i>... interne de paroi opaque extérieure</i>	<i>3</i>
<i>... de surface extérieur de vitrage extérieur</i>	<i>4</i>
<i>... de surface intérieur vitrage extérieur</i>	<i>5</i>
<i>... de surface de paroi interne</i>	<i>6</i>
<i>... interne de paroi interne</i>	<i>7</i>
<i>... de surface de paroi inter zone verticale</i>	<i>8</i>
<i>... interne de paroi inter zone</i>	<i>9</i>
<i>... de surface de paroi sol</i>	<i>10</i>
<i>... interne de paroi sol</i>	<i>11</i>
<i>... de flux nul</i>	<i>12</i>
<i>... de surface supérieur de paroi inter zone horizontale</i>	<i>13</i>
<i>... de surface inférieur de paroi inter zone horizontale</i>	<i>14</i>
<i>... de surface de vitrage inter zone</i>	<i>15</i>
<i>... de température sèche (ou d'air)</i>	<i>16</i>
<i>... de température radiante moyenne</i>	<i>17</i>

Sur le bâtiment vu en coupe de la figure 88, nous n'avons représenté (à l'aide d'un rond blanc) que certains des noeuds de la discrétisation thermique. Pour ces noeuds, nous avons indiqué à l'aide d'un numéro issu du tableau précédent le type absolu correspondant :

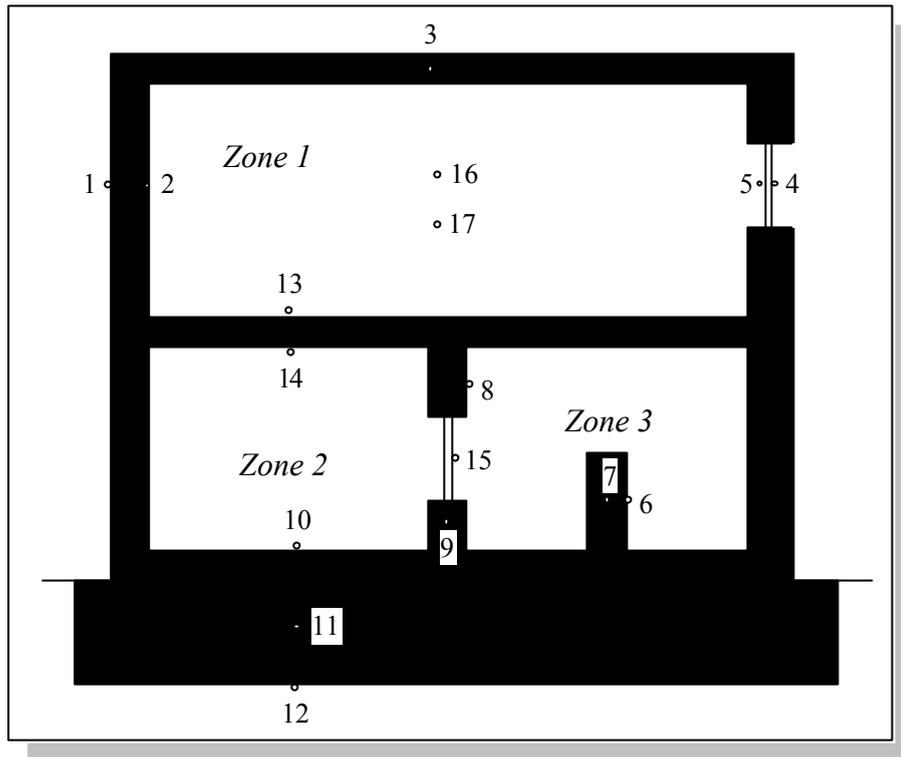


Fig. 88 : Coupe de profil d'un bâtiment et types absolus des noeuds rencontrés

Le caractère multizone nécessite le repérage des noeuds par rapport au zonage choisi. En effet, tous les noeuds de discrétisation de composants d'inter ambiance appartiennent simultanément à deux zones. La structure contiendra donc deux numéros de zones. Remarquons que le numéro d'inter ambiance aurait été suffisant : cependant, notre processus de calcul nécessitant fréquemment de tester l'appartenance d'un noeud à une zone, nous avons préféré dupliquer cette information. En plus de la numérotation incrémentale des noeuds, chaque noeud se voit attribuer un numéro relatif à une zone. Pour l'une des zones à laquelle le noeud appartient, ce numéro relatif est égal au numéro de ligne de son équation de bilan dans le système des équations de bilan de la zone (système qui mis sous forme matricielle constitue l'équation d'évolution d'état).

De plus, chaque noeud va posséder, en plus de son type (absolu), un type relatif à la zone. En effet, dans notre processus de connexion des zones entre elles, certains noeuds jouent un rôle particulier, en ce que dans leur équation de bilan interviennent des termes concernant la zone adjacente (noeuds de connexion du paragraphe 2.6.2.3). La figure 89 de la page suivante, au départ d'un maillage 3R2C d'une paroi inter ambiance, détaille la structure de noeuds :



caractéristiques liées au rayonnement (coefficients d'absorption et de réflexion - du direct et du diffus à incidence nulle pour un vitrage et global pour une paroi - et émissivité de grande longueur d'onde).

La composition de cette structure étant comprise, un module de *CODYRUN* se charge de la construire au départ de la description hiérarchique du bâtiment, avant de démarrer la simulation. Ce module est le maillage de notre problème physique, et à cette fin, traite séquentiellement chacune des zones et parois et chacun des vitrages. A des fins de vérification de l'exactitude du maillage, nous avons été amenés à réaliser une édition de la structure de noeuds. Un exemple en est donné en Annexe D.

#### 4.4.1.2. Intérêt présent et futur de cette structure :

Au départ de cette structure, il est aisé de remplir les objets (éléments de la décomposition de l'équation d'évolution) d'une zone. En effet, il suffit de balayer la structure noeuds et d'effectuer l'affectation des termes concernés. Soit par exemple à remplir la matrice  $A_{COND}$  d'une zone. Par balayage de la structure, il est possible de ne sélectionner (à l'aide de leur type) que les noeuds de parois et vitrages (types absolus autres que 16 et 17 sur la figure 88), appartenant de surcroît à la zone considérée, indicée par  $nZ$ . Une condition nécessaire pour vérifier cette dernière condition est alors que l'un au moins des numéros de zone d'appartenance soit égal à  $nZ$ . Soit  $n$  l'un de ces noeuds. A ce moment, le noeud  $n$  possède dans la zone  $nZ$  un numéro relatif  $i$ . La structure nous informe aussi du numéro absolu du noeud  $m$  auquel  $n$  est connecté, et de la valeur de la conductance  $k_{n,m}$ . Ce noeud  $m$  possède lui même un numéro relatif dans la zone  $nZ$ , soit  $j$ . Remplir la matrice  $A_{COND}$  avec le terme correspondant à la connexion entre les noeuds absolus  $n$  et  $m$  se réalise simplement en plaçant  $k_{n,m}$  en  $A_{COND}[i, j]$  et  $A_{COND}[j, i]$ .

La même démarche est utilisée pour remplir tous les autres objets de l'équation d'évolution, en faisant appel aux données météorologiques du pas de temps en cours pour les vecteurs liés aux sollicitations et à une approximation des températures adjacentes pour les termes de connexion. Il est alors possible d'affiner le module de résolution d'une zone de la façon suivante :

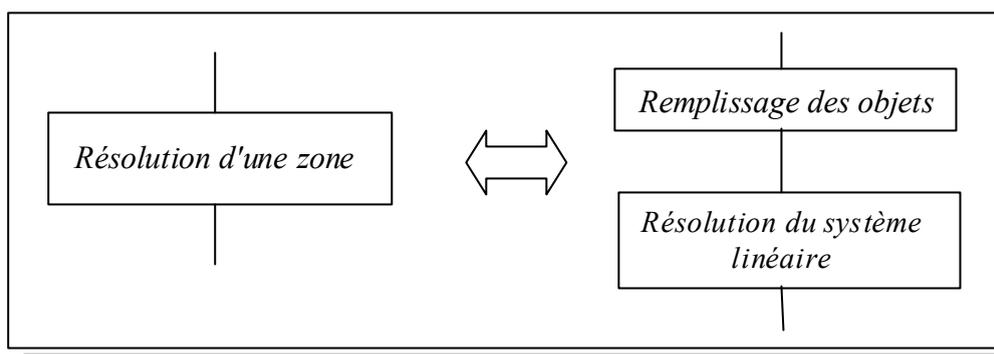


Fig. 90 : Détail de la résolution d'une zone

L'intérêt de cette structure apparaît encore nettement au regard du développement futur d'outils spécifiques à *CODYRUN* :

- L'exemple le plus simple est celui de la réduction de zonage. Un bâtiment étant décrit, notons que le zonage adopté conditionne cette description. Au départ d'une description multizone, le but à atteindre sera de pouvoir simuler le bâtiment en considérant un nombre de zones qui soit inférieur à celui prévu par le zonage de la description. Pour éviter la ressaisie du bâtiment, il suffit de modifier sensiblement la structure de noeuds. En effet, considérons la figure 88 du paragraphe 4.4.1.1, et supposons que le problème soit de considérer les zones 2 et 3 comme une seule zone portant le numéro 2. Pour cela il suffit dans la structure de noeuds originale de supprimer les deux lignes correspondant aux noeuds de température sèche et radiante moyenne de la zone 3. Tous les noeuds de la paroi et du vitrage séparant les zones 2 et 3 deviennent noeuds de paroi interne. Le volume de la nouvelle zone devient égal à la somme de celui des zones 2 et 3. Pour l'ensemble de la structure, les références à la zone 3 sont remplacées par 2.

Si vis à vis de la thermique, il suffit alors de relancer la simulation après traitement de la structure de noeuds, notons au passage que certaines modifications (mineures) sont à opérer vis à vis de l'aéraulique et des transferts d'humidité. Toujours sur la figure 88, si les zones 2 et 3 étaient de plus séparées par une ouverture, il aurait fallu ne pas en tenir compte dans le système en pression.

- Un second exemple sensiblement plus complexe est celui de la globalisation (ou agrégation) de parois au sein d'une ou de chacune des zones, de manière à diminuer le temps de calcul. Pour tester différentes variantes, l'idée est de ne globaliser que des parois répondant à certains critères. L'inertie pouvant être l'un de ces critères, la globalisation revient à un pré traitement de la

structure de noeuds. Si la globalisation n'affecte pas alors les noeuds de température sèche et radiante moyenne, elle va se traduire par une diminution du nombre de noeuds de paroi.

D'une manière plus générale, la structure de noeuds, dont la taille devient rapidement importante, peut faire l'objet d'un traitement (en vue de sa réduction) à l'aide de règles expertes (choix automatique du zonage fonction de l'objectif, choix optimal de modèles conductifs, globalisation sélective, ...).

#### 4.4.2. L'organisation des objets liés au calcul :

Le paragraphe précédent montrait la méthode utilisée pour remplir les objets issus de la décomposition de l'équation matricielle d'état d'une zone. Vis à vis des calculs thermiques, le comportement thermique d'une zone est entièrement déterminé dès lors que sont connus ces objets. La question qui reste en suspens est celle de la gestion de ces objets. L'implémentation des tableaux (ou vecteurs) ne pose aucun problème en langage C, l'équivalence étant presque totale entre un pointeur sur le premier élément et l'adresse du tableau. Toutes les opérations habituelles liées à la manipulation des pointeurs sont alors utilisables. Vis à vis des matrices, il n'en est pas de même. La représentation d'une matrice à l'aide de pointeurs pouvant se faire de différentes façons, notre choix s'est arrêté sur celui de [Press 88]. Avec cette convention, une matrice est gérée comme un tableau d'adresses, chaque adresse étant celle d'une ligne. La figure 91 explicite la démarche pour une matrice de dimension 4 :

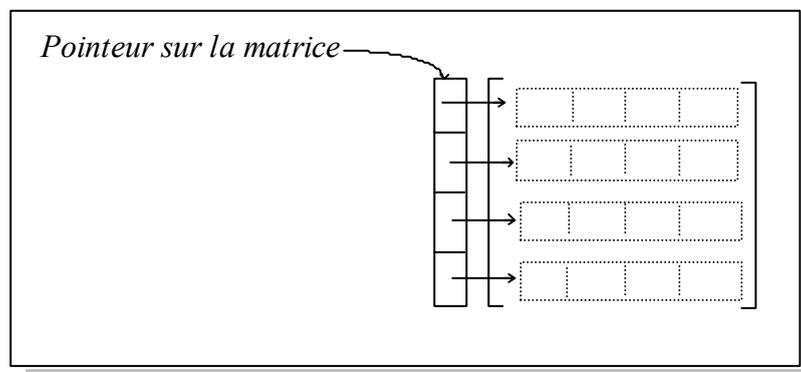


Fig. 91 : Pointeur sur une matrice

Une zone, du point de vue numérique, est un ensemble de dix matrices et de treize vecteurs. Pour ce faire, nous définissons de manière interne au programme de calcul une zone comme étant une structure contenant deux adresses (ou pointeurs). La première est celle du tableau de matrices élémentaires (contenant donc dix positions) et la seconde concerne les vecteurs.

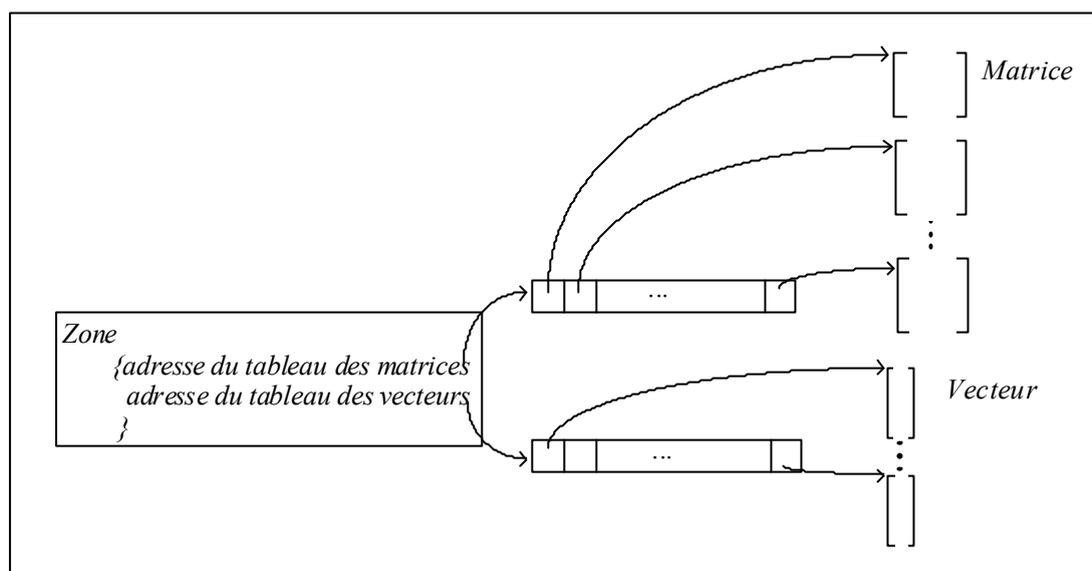


Fig. 92 : Topologie mémoire du modèle thermique d'une zone

#### 4.5. Organisation du module aéralique :

Le modèle aéralique dans lequel les débits sont supposés connus ne pose pas problème. Il suffit de sélectionner ce modèle dans la fenêtre bâtiment et d'attribuer aux inter ambiances concernées des composants d'un type particulier. L'information associée est une valeur signée du débit volumique, avec éventuellement des profils. Le modèle aéralique dont il sera question dans ce paragraphe est celui dit détaillé, nécessitant le calcul des pressions de référence dans chacune des zones. A un pas de temps donné, le module aéralique répond à l'organigramme suivant :

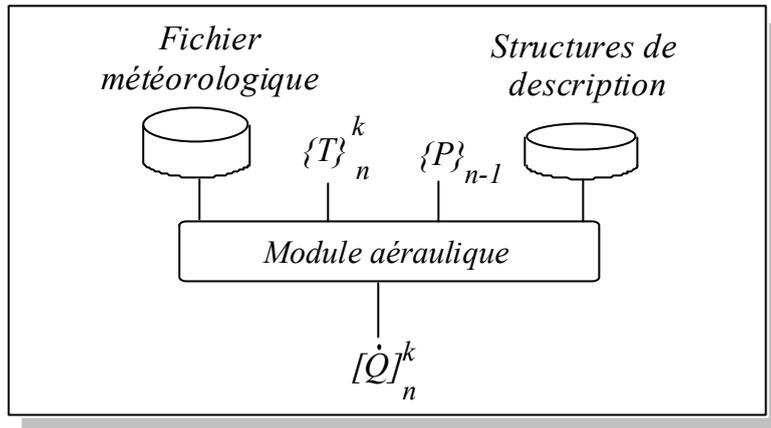


Fig. 93 : Le module aéraulique

#### 4.5.1. Les composants et leur description :

Il s'agit des débits de ventilation mécanique contrôlée, ainsi que les grandes et petites ouvertures. L'ensemble des données de description nécessaire est alors partagé entre la structure des composants et celle des ouvertures, ouvertures prises au sens large car comprenant les débits de ventilation mécanique. En plus d'un numéro d'ouverture incrémental indexant la structure, chaque ouverture possède un type, permettant de différencier les trois types d'ouvertures se trouvant dans la structure. Pour une ouverture, le reste de la structure est alors constitué de la concaténation des champs d'information relatif à chacune des ouvertures. Un débit de ventilation mécanique possède les mêmes caractéristiques qu'un composant débit connu, à ceci près que l'élément d'appartenance ne peut être qu'une inter ambiance de type extérieure. Pour une petite ouverture, sa côte par rapport au niveau de référence, l'exposant de l'écoulement, le coefficient de décharge et la surface ou la perméabilité, sont à renseigner. Pour une grande ouverture, la côte, la hauteur et la largeur sont demandées. En prévision de travaux futurs, une information de type modèle est prévue (principalement en vue de l'intégration d'un modèle basé sur un écart de température autre que celui de la différence des températures sèches des zones).

#### 4.5.2. L'organisation des calculs :

Pour évaluer les débits, les écarts de pression au travers de chaque ouverture sont d'abord calculés. En raison du modèle intégré des grandes ouvertures, il est aisé d'uniformiser le traitement des grandes et les petites ouvertures, en éclatant dans la structure les grandes ouvertures en deux petites

ouvertures possédant les caractéristiques prévues par Walton. Les ouvertures obtenues sont alors qualifiées d'ouvertures élémentaires. De cette manière, le bâtiment est vu comme n'étant constitué que de débits de ventilation mécanique et d'un réseau de petites ouvertures élémentaires.

Conformément à l'organigramme de la figure 94, à un pas de temps de donné, le programme calcule tout d'abord les coefficients de pression sur chacune des inter ambiances extérieures du bâtiment. Le calcul est basé sur l'interpolation pour une incidence du vent quelconque des coefficients de pression expérimentaux mesurés tous les  $30^\circ$ , ces coefficients étant fonction du type de bâtiment et de l'environnement. Ces informations proviennent de la fenêtre Bâtiment (voir figure 83), le bouton *Morphologie* permet de choisir parmi les types proposés (maison individuelle, petit collectif, tour) alors que celui intitulé *Environnement* propose zone rurale sans environnement, zone rurale avec environnement et zone urbaine.

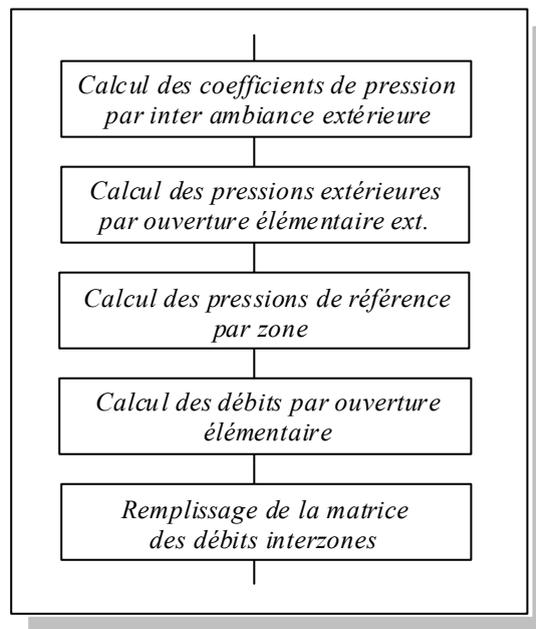


Fig. 94 : Détail des calculs aérauliques

Pour chacune des ouvertures élémentaires appartenant à une inter ambiance extérieure (ce qui exclut les bouches de ventilation), les coefficients de pression étant connus, il est possible de calculer les pressions extérieures. Au départ des pressions du pas de temps précédent, en écrivant les bilans massiques (prenant en compte le nouveau régime de sollicitations météorologiques et thermiques), les pressions de référence des zones sont déterminées. Ce module sera détaillé au prochain paragraphe.

A ce moment, les pressions sur la face intérieure des ouvertures extérieures, ainsi que celles sur chacune des faces des ouvertures inter zones, peuvent être calculées. L'application de l'équation de débit à chacune des ouvertures élémentaires détermine les débits. La dernière étape utilise ces débits élémentaires pour remplir la matrice des débits inter zones, avec les remarques suivantes. Pour deux zones indicées par  $i$  et  $j$ , le terme  $[i,j]$  de la matrice est affecté du signe positif si le débit d'air traverse de la zone  $i$  vers  $j$ . Dans le cas d'ouvertures multiples, ces débits massiques provenant de deux ouvertures élémentaires ne se cumulent que s'ils sont dans le même sens. En effet, vis à vis du bilan sensible et latent d'une zone, il faut aussi être capable de retrouver au départ de cette matrice les débits entrants et sortants de la zone. La figure 95 donne un exemple du remplissage :

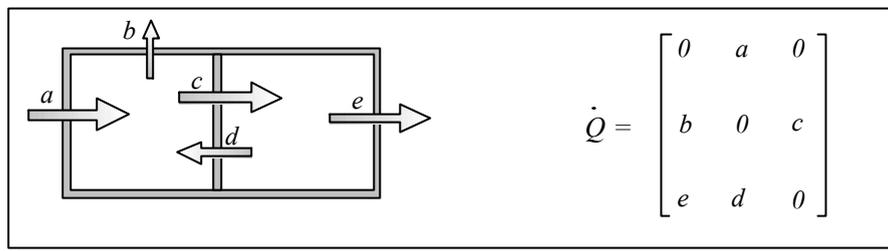


Fig. 95 : Exemple de matrice des débits massiques inter zones

Un point de détail lié à l'aspect numérique est la nécessité vis à vis de l'aéroulque de gérer dans les calculs des réels de double précision. En effet, l'intégration des grandes ouvertures conduit localement à des écarts de pression très faibles et à une matrice Jacobienne mal conditionnée.

#### 4.5.3. Détail du calcul des pressions de référence :

La résolution du système non linéaire se faisant au travers d'un schéma itératif, le calcul des pressions par zones nécessite la gestion de plusieurs tableaux ou vecteurs. Le but étant de déterminer  $\mathbf{p}_n$ , vecteur des pressions de référence du pas de temps actuel.  $\mathbf{p}_{n-1}$  désigne donc le vecteur des pressions du pas de temps précédent. Le nombre d'itération étant indicé par  $k$ ,  $\mathbf{p}_n^k$  est le vecteur des pressions estimé à l'itération  $k$ . Le critère d'arrêt le plus simple, celui de la convergence des pressions au travers d'une norme (par exemple quadratique), est moins intéressant que celui basé sur l'exactitude du bilan massique de chaque zone. C'est ce dernier que nous avons intégré.

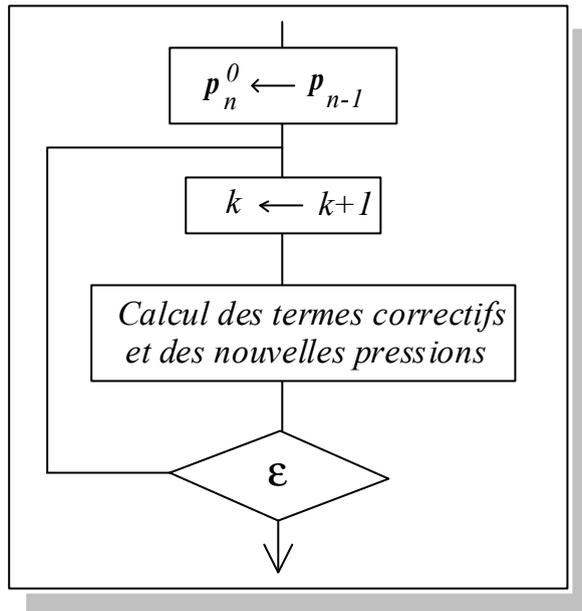


Fig. 96 : Détail de la résolution du système non linéaire

Le calcul du vecteur des termes correctifs  $D^k$  nécessite à chaque itération le l'établissement du Jacobien  $J$  et du vecteur des bilans résiduels  $B$ . Nous avons vu que le calcul des dérivées partielles faisait intervenir les débits élémentaires calculés avec l'estimation des pressions de l'itération précédente. L'organigramme est donc le suivant :

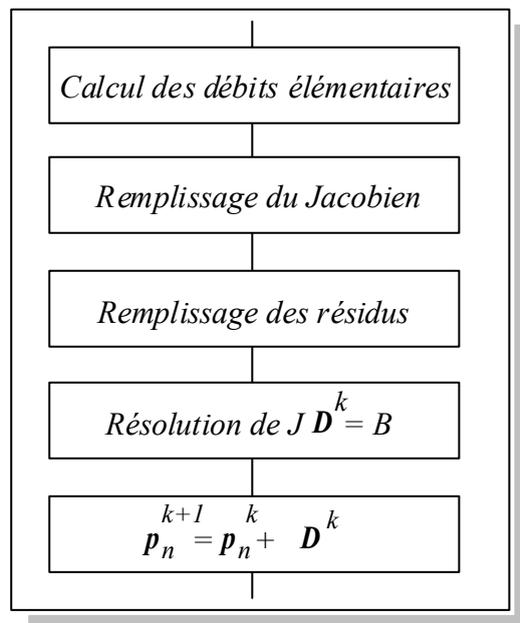


Fig. 97 : Organisation des calculs aérauliques

La résolution du système linéaire ne posant pas problème, elle est effectuée au départ de la procédure mise en place pour le module thermique, à savoir la décomposition en deux matrices de type L et U [Press 88] . Il a cependant été nécessaire de la transformer pour traiter les réels en double précision.

#### 4.6. Organisation du module hydrique :

En raison du découplage opéré, les températures sèches de chacune des zones ainsi que les débits inter zones ont été préalablement calculés. A ce moment, pour un bâtiment donné, une équation matricielle du type  $C_h \dot{r} = A_h r + B_h$  régit l'évolution des humidités spécifiques de chaque zone. De dimension égale au nombre de zones, les éléments à prendre en compte pour l'établissement de  $C_h$ ,  $A_h$  et  $B_h$  sont des informations relatives aux zones, aux débits aérauliques et aux systèmes de climatisation présentant une part latente. De la même façon que pour le système thermique,  $A_h$  et  $B_h$  sont décomposés en plusieurs éléments qu'il est simple de remplir à un pas de temps donné, pour construire un système linéaire résolu à l'aide d'un schéma aux différences finies. Vis à vis de l'organisation, une différence de taille par rapport au modèle thermique est que ce système est caractéristique du bâtiment. Les éléments de la décomposition sont alors des variables globales.

Un point particulier est celui de la prise en compte de l'humidification ou de la déshumidification. L'algorithme implanté, schématisé sur la figure 98, est très semblable à celui visant à la prise en compte de la climatisation sensible. Dans le système matriciel formé par les équations de bilans latents des zones, le remplissage de la ligne liée à une zone peut être fait selon deux objectifs, le premier lorsque l'humidité est inconnue, le second lorsque la puissance d'humidification (ou de déshumidification) est recherchée. Lorsque dans toutes les zones, l'inconnue est l'humidité, nous dirons que nous résolvons le système en humidité (la puissance étant alors une donnée). A l'inverse, lorsque pour les zones affectées d'un système de traitement d'air comportant une part latente l'inconnue est la puissance, nous parlerons du système en puissance latente.

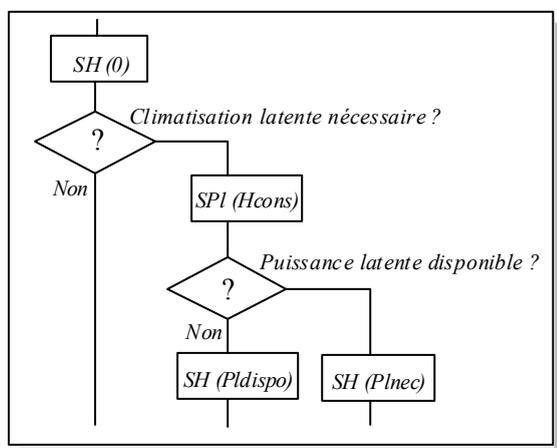


Fig. 98 : Algorithme de régulation concernant l'humidité

avec  $SH(0)$  : résolution du système en humidité, les puissances latentes de climatisation de chacune des zones étant nulles.

$SPI(Hcons)$  : résolution du système en puissance latente, les humidités relatives des zones climatisées étant égales aux consignes désirées.

$SH(Pldispo)$  : résolution du système en humidité, la puissance latente mise en jeu pour

une zone étant celle nécessaire (si cette puissance est installée) ou dans le cas contraire celle disponible .

$SH(P_{nec})$  : résolution du système en humidité, les puissances sensibles latentes étant égales à celles nécessaires au maintien des consignes

#### 4.7. Le bandeau de menu de l'application :

Le bandeau de menu constitue pour une application développée sous *Windows* le point d'accès à l'application. Au travers d'une norme, *Common User Interface*, Microsoft® définit deux éléments de menu fondamentaux d'une application *Windows*, à savoir *Fichier* et *Edition*. Le premier menu permet d'opérer (au travers de menus déroulants) toutes les manipulations habituelles sur un fichier, c'est à dire l'ouverture, la fermeture et par exemple l'impression. Le second élément de menu, *Edition*, est lié à l'utilisation du *presse papier*, c'est à dire celui d'un espace mémoire servant à faire du transfert d'information.

En marge du dénominateur commun précédent, les autres éléments du menu sont d'une affectation spécifique à chaque application. Notre bandeau est présenté sur la figure 99 :

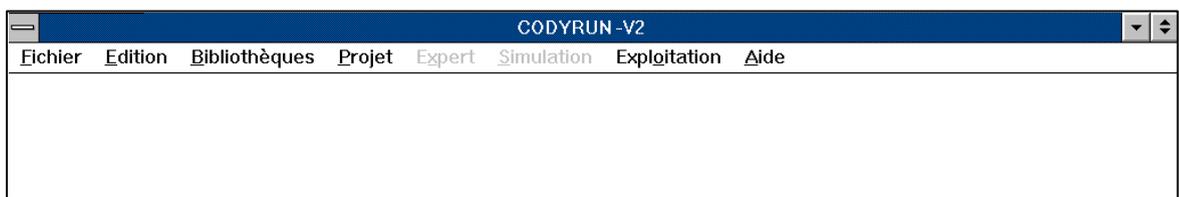


Fig. 99 : Le bandeau de CODYRUN

Les éléments de la ligne de titre de la figure précédente (l'écran d'accueil de *CODYRUN*) constituent le bandeau de menu de l'application. Sans entrer dans le détail de chacune des commandes, il est possible de donner un résumé des commandes utilisables.

- **Fichier** : Dans *CODYRUN*, les fichiers manipulés sont de différents types, le plus commun étant *bâtiment*. Un bâtiment est alors un fichier, comportant notamment toutes les informations liées à la description. Parmi les autres types de fichiers, se trouvent les fichiers météorologiques. Dans l'état actuel, l'ouverture d'un fichier météorologique ne permet que sa consultation en mode texte à l'écran. Un autre type est celui des fichiers en mode texte, créés en cours de simulation par l'application elle-même, à des fins de documentation (description textuelle du bâtiment par exemple, voir Annexe C) ou de mise au point (enregistrement à chaque pas de temps ou itération de certains objets). D'autres types de fichiers, projet notamment, seront abordés plus en avant. A des fins de documentation, un sous menu Imprimer permet la création en mode texte et

l'impression d'un fichier comportant pour le bâtiment donné l'ensemble des informations décrites dans les fenêtres.

- **Edition** : La première application de ce menu est celle de la gestion du *copier-coller*, concept introduit initialement dans les logiciels de traitement de texte, au travers des sous menus *Copier*, *Coller* et *Effacer*. Son application à notre entité bâtiment est très intéressante lors de la description, car elle permet de diminuer notablement le temps nécessaire à la saisie. Le presse-papiers de l'application peut alors contenir une zone, une inter ambiance ou encore un composant. Il est alors possible de dupliquer les éléments précités. Toujours à propos du collage, un autre sous menu est intégré, assurant la copie d'un élément de type zone ou inter ambiance, avec en même temps que l'ensemble des composants appartenant à l'entité. Dans le cas d'un immeuble de bureaux présentant souvent les mêmes équipements par zone (éclairage, système de climatisation, ...) ou par inter ambiance (ouvertures, vitrages, murs, ...), ce dernier collage (ou *Collage spécial*, terme rencontré dans certains logiciels de présentation) permet de ne décrire effectivement qu'un nombre réduit d'entités.

La seconde fonctionnalité de ce sous menu est de permettre des opérations d'édition d'un bâtiment. En plus des opérations de création (cette fois au départ du menu), il est possible de consulter les listes des entités constitutives du bâtiment (liste des zones, des inter ambiances, des parois, ...) et de réaliser un accès direct à cette entité. Cette dernière fonctionnalité est apparue à l'usage, la recherche d'un composant à l'aide des boutons de navigation pouvant s'avérer fastidieuse.

- **Bibliothèques** : Toujours dans l'idée de faciliter l'aide à la description, *CODYRUN* gère dynamiquement les bibliothèques suivantes : matériaux, parois, vitrages, charges internes et profils. Les profils sont des tableaux contenant 24 pourcentages, pouvant venir moduler différents éléments : la puissance d'un système de climatisation, un débit de ventilation, ... Un exemple en est donné figure 113, page 200. La gestion de chacune des bibliothèques est d'une part accessible depuis ce menu, pour des opérations de consultation, de modification, d'ajout ou de suppression d'articles. En cours de description d'un bâtiment, l'opération la plus courante est celle de l'importation d'un article de la bibliothèque.

La figure ci-contre est celle de la fenêtre d'accès à la bibliothèque des matériaux. En cas de création d'un élément spécifique, le bouton *Ajout Biblio* permet d'ajouter le nouvel article à la bibliothèque concernée. En consultation, les boutons *Suivant* (>) et *Précédent* (<) autorisent la visualisation séquentielle des articles précédemment saisis.

The image shows a software window titled "Bibliothèque des matériaux". It contains several input fields and buttons. The "Matériau" field is filled with "Polystyrène". The "Conductivité thermique" field is filled with "0.04" and has the unit "W/ m.K" next to it. The "Capacité calorifique" field is filled with "1380" and has the unit "J/kg.K" next to it. The "Masse Volumique" field is filled with "25" and has the unit "kg/m<sup>3</sup>" next to it. There are two navigation buttons, "<" and ">", and an "Ajout Biblio." button. At the bottom, there are "Annuler" and "OK" buttons.

Propriété	Valeur	Unité
Matériau	Polystyrène	
Conductivité thermique	0.04	W/ m.K
Capacité calorifique	1380	J/kg.K
Masse Volumique	25	kg/m <sup>3</sup>

Fig. 100 : Fenêtre d'accès à la bibliothèque des matériaux.

- **Expert** : D'un caractère expert thermicien, ce menu comporte trois volets correspondant à trois sous menus.

Le premier, *Résolution*, permet le choix des paramètres liés à la résolution numérique. Venant moduler la précision de l'outil et le temps calcul, cette fenêtre, reproduite par la figure 101, permet de doser les deux aspects précédents, ce fonction de l'objectif. Il est ainsi clair que vis à vis de l'étude d'un bâtiment à l'échelle d'une saison de chauffe ou celle du transitoire lié à la mise en route d'un système de climatisation, les mêmes choix ne doivent pas être effectués au niveau des modèles élémentaires des phénomènes, mais aussi vis à vis de la procédure générale de résolution. Pour l'évolution des températures, il s'agit du nombre de jours d'initialisation, du pas de temps (pour l'instant bloqué à une heure), des températures initiales et du schéma de résolution. De plus, c'est à ce niveau que se fait la décision de reboucler ou non sur la convergence des températures (le processus itératif de couplage thermique des zones) et de la précision du test d'arrêt. Les pressions initiales, la méthode de résolution du système non linéaire, ainsi que le choix et la précision du critère de convergence, sont à informer pour la partie aéraulique.

**Paramètres Résolution**

Nombre de jours d'initialisat\* du bâtiment :

Choix du pas de temps

Fixe, =  secondes  Variable

Résolution Système thermique

Températures initiales :  °C

Différences finies Explicites

Différences finies, Crank Nicolson

Schéma de Connexion entre les zones

Itératif, Epsilon / Tz =  °C

Non itératif

Périodicité du calcul de la déclinaison :  jours

Consignes T\* = Text Hre =

Résolution Système Aéraulique

Sans Tirage Thermique

Pressions initiales :  Pa

Test Arrêt

Converg. des press.  Pa

Bilan massique < à ...  Kg

Résolution SNL

Newton Raphson, Coef. relax =

Newton Raphson Optimisée

Modulation surf. GOI (CLARK)

Options par défaut

OK

Fig. 101 : Fenêtre des paramètres de la résolution

Le second sous menu, que nous avons intitulé *Trace*, permet d'archiver sur disque en cours de simulation certains objets, ce à des fins de mise au point ou d'expertise fine des phénomènes. La fenêtre illustrant les choix possibles, ainsi qu'un exemple de sortie, a été reportée en Annexe D. Un exemple du premier but évoqué est celui du suivi à chaque pas de temps du vecteur des sollicitations de courtes longueur d'onde dans une zone donnée. Un autre en est l'écriture sur disque au format texte de la structure de noeuds, permettant ainsi de contrôler le maillage (voir Annexe D). Il s'agit enfin d'un outil d'expertise, par exemple dans le cas où les variables tracées sont les débits au travers de chacune des ouvertures du bâtiment. Nous utiliserons par exemple ces variables au chapitre des illustrations, au paragraphe 5.3.3.2, figure 114. Notons que dans chacun des cas, le fichier généré porte l'extension (.fic) permettant de consulter ces fichiers directement depuis le menu Fichier Ouvrir. Cela évite de devoir sortir de l'application pour lancer un éditeur ou un traitement de texte pour consulter ce fichier.

Le dernier, *Outil*, contiendra une fois réalisé des outils (ayant trait à la diminution des temps de calcul) évoqués dans l'exposé, tel que la réduction de zonage et la globalisation sélective de parois.

- **Simulation** : Un bâtiment et un fichier météorologique étant choisis, la simulation consiste à lancer le programme pour la séquence de jours choisis. A chaque pas de temps, les résultats sont consignés dans un fichier, avec certaines options de stockage. Actuellement, le choix des résultats partiels implique à chaque heure l'enregistrement des températures (sèches et radiantes), de l'humidité relative et des puissances appelées dans chacune des zones. Dans le cas du choix des résultats complets, l'ensemble des températures de tous les noeuds est enregistré. Dans cette fenêtre apparaissent alors en cours de simulation les numéros du pas de temps en cours, de la zone traitée par le système thermique, et du nombre d'itérations liées à la connexion des zones et à la résolution du système aéraulique. A toutes fins utiles, un bouton permet d'interrompre les calculs.
- **Exploitation** : la simulation effectuée, l'exploitation du fichier résultat peut se faire en exportant des tableaux de résultats en mode texte vers des tableurs. *CODYRUN* intègre un outil de tracé de courbes, permettant de superposer des courbes provenant en particulier de fichiers différents, ce par exemple à des fins de comparaison de réponses utilisant des modèles différents.

- **Aide** : A terme, une aide en ligne complète devrait être intégrée à l'outil. Celle existant à ce jour n'est qu'embryonnaire, mais témoigne de possibilités très interactives. (Index de recherche, accès à l'aide en cours de description, ...).
- **Projet** : La notion de projet a été introduite pour parer aux problèmes que pose l'archivage séparé des fichiers météorologiques, bâtiments et résultats. Pour une simulation mettant en jeu les trois types de fichiers, il n'existe en général aucun lien logique entre les fichiers précédents, permettant de répondre par exemple à la question de savoir à quel bâtiment correspond tel fichier résultat. Le plus souvent, l'utilisateur assure artificiellement le lien, par exemple en donnant au bâtiment et au fichier résultat un même nom, mais une extension différente.

Dans notre cas, compte tenu du choix de la séquence météorologique et des paramètres de la résolution (pas de temps, températures d'initialisation, méthodes de résolution, ...), une meilleure gestion de l'archivage des simulations s'est avérée nécessaire. Partant du constat que tant vis à vis des aspects conception et recherche, le nombre de simulations effectuées sur un même bâtiment peut devenir rapidement important, la notion de projet est rattachée à un bâtiment et est décrite par la fenêtre suivante.

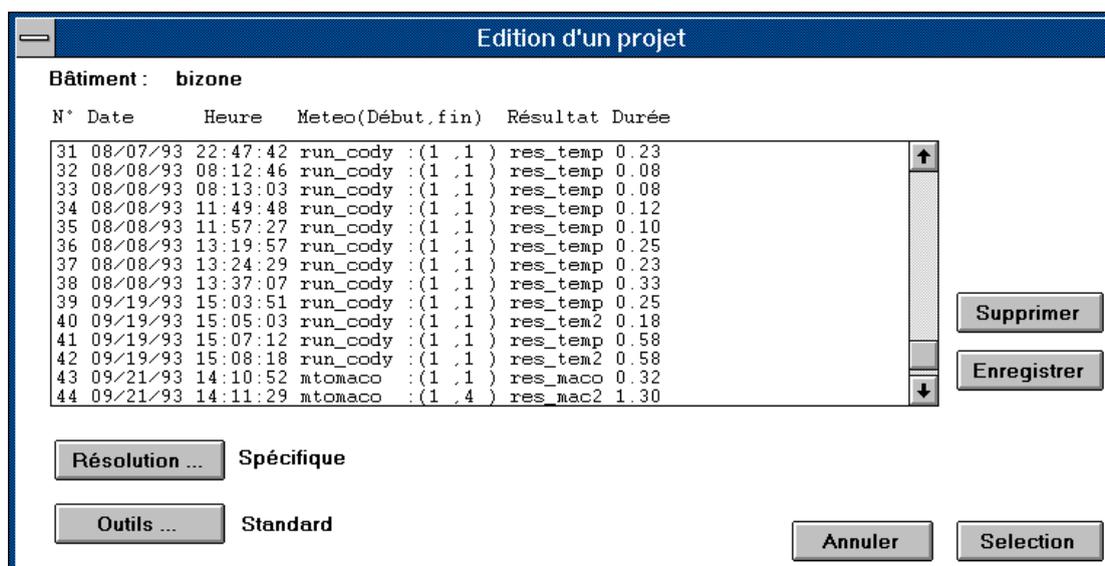


Fig. 102 : La fenêtre projet

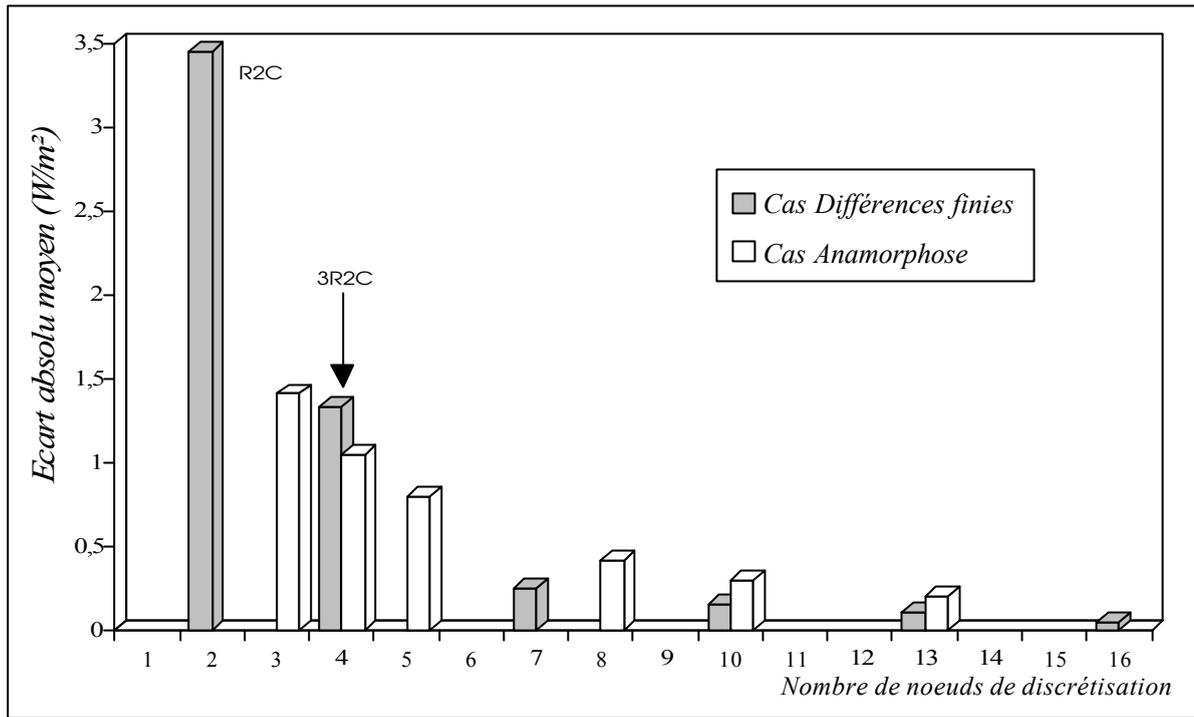
Il s'agit d'un ensemble d'articles, chacun d'entre eux regroupant principalement un nom de fichier météorologique (et les numéros de jours entre lesquels la simulation est effectuée), un nom de fichier résultat ainsi que les paramètres de la résolution alors choisis. Sur ces articles listés dans la boîte de gauche de la fenêtre, différentes opérations sont réalisables. Lors de la sélection d'un article, la fenêtre du bâtiment concerné apparaît à l'écran, les noms des fichiers météorologique et résultat sont prépositionnés (pour la simulation et le tracé de courbes), de même que l'intervalle de simulation. De plus, les informations liées aux paramètres de la résolution sont positionnées.

#### **4.8. Conclusion :**

Le logiciel *CODYRUN* brièvement présenté est le prolongement logique des chapitres précédents. Les deux orientations du logiciel se retrouvent alors au niveau de l'interface, avec la cohabitation d'aspects liés à la conception des bâtiments et d'autres, plus physiques, ayant trait aux modèles mis en jeu. Toutefois, quand bien même l'objectif fixé est atteint, nous préférons voir en l'état du logiciel une plate forme ouvrant la voie à de nouveaux travaux, tant dans le sens d'une aide à la conception plus efficace que vis à vis de l'intégration de nouveaux modèles.

Pour assurer la transition avec le chapitre suivant, dédié à la validation et aux illustrations de *CODYRUN*, signalons qu'il présente quelques autres fenêtres de l'interface.

# **Chapitre 5. Validation et Illustrations de *CODYRUN***





5. Validation et Illustrations .....	183
5.1. Introduction.....	186
5.2. La problématique de la validation des logiciels de simulation :.....	186
5.3. Amorce de la validation de CODYRUN :.....	189
5.3.1. Comparaison avec un autre code de calcul : CODYBA.....	189
5.3.1.1. Déroulement des comparaisons :.....	190
5.3.1.2. Quelques résultats :.....	192
5.3.2. Considérations sur les transferts d'humidité :.....	194
5.3.2.1. Régime impulsionnel :.....	194
5.3.2.2. Régime dynamique :.....	195
5.3.2.3. Analogie électrique :.....	196
5.3.3. Les tests aérauliques :.....	198
5.3.3.1. Tirage thermique et petite ouverture :.....	198
5.3.3.2. Vent et VMC :.....	200
5.3.4. Comparaison avec des mesures :.....	203
5.3.4.1. Le bâti expérimental :.....	203
5.3.4.2. La modélisation du dispositif de mesure :.....	204
5.3.4.3. Les résultats :.....	206
5.4. Illustrations du logiciel :.....	208
5.4.1. Description du cas d'étude :.....	208
5.4.2. Le choix du modèle du diffus :.....	209
5.4.2.1. Incidence du choix :.....	210
5.4.2.2. Commentaires :.....	211
5.4.3. Application sélective du modèle convectif intérieur :.....	212
5.4.3.1. Composant Système de traitement d'air :.....	212
5.4.3.2. La convection intérieure :.....	213
5.4.3.3. Exploitation :.....	213
5.4.4. Comparaison de modèles conductifs de parois :.....	216
5.4.4.1. Analyse comparative de modèles :.....	217
5.4.4.2. Intérêt de l'optimisation du maillage :.....	219

5.5. Conclusion : ..... 221

## 5.1. Introduction

Les chapitres suivants nous ont mené à la réalisation d'un logiciel qu'il convient maintenant de présenter au travers de quelques illustrations. Les cas étudiés permettent de retrouver la décomposition fonctionnelle effectuée dans notre plan, concernant les aspects thermiques, hygrothermiques et aérauliques. Nous avons aussi choisi de mettre en avant de mettre en avant les points originaux de notre travail, tels que l'aspect multi modèle, l'application sélective de modèles et le traitement de la conduction en conditions anamorphoses.

Simultanément, nous allons procéder à une approche de la validation de notre outil. Cette étape importante pouvant faire à elle seule l'objet d'une thèse, nous ne donnons que quelques pistes.

## 5.2. La problématique de la validation des logiciels de simulation :

Bloomfield précise tout d'abord qu'il n'est pas envisageable de vérifier l'exactitude de l'ensemble des scénarios possibles d'un code de simulation thermique, de tester la validité de chacune des hypothèses simplificatrices, ce dans toutes les situations possibles [Bloomfield 89]. Une définition de la validation est alors proposée : *Test de la cohérence physique des résultats produits par un programme qui s'appuie sur des procédures numériques et mathématiques.*

Un code de simulation est la transcription informatique de la perception qu'à le modélisateur des phénomènes à simuler. Plusieurs types d'erreurs peuvent alors apparaître, que nous allons classer dans l'ordre de la genèse de l'application :

- Erreur de perception
- Erreur de modélisation
- Erreur de codage

Vis à vis du premier genre, la démarche du modélisateur fait toujours l'objet d'hypothèses simplificatrices et de restrictions du domaine de validité. Par exemple, un modèle des transferts aérauliques ne tenant compte que du vent est simplifié et ne sera pas efficient dans le cas où les déplacements d'air sont liés au moteur thermique. Le code de calcul, s'il est utilisé dans ces

conditions, sera mis en défaut en raison d'une erreur de perception de la réalité physique du phénomène aéraulique.

Une fois les erreurs de modélisation corrigées, celles liées au codage informatique sont pratiquement inévitables, ce à cause de la taille des codes de simulation actuels (500000 lignes pour *ESP* [Clarke 85], plusieurs dizaines de milliers pour *OASIS* [Babage 86] ou encore 38000 pour *CODYRUN*). La correction des ces erreurs est en particulier très problématique: sauf manifestation évidente (perte de contrôle du programme, ...), la probabilité pour qu'un programmeur localise une erreur dans son code diminue de façon exponentielle avec le nombre de ses relectures. D'expérience, le développeur doit alternativement se placer en tant que thermicien pour juger de la cohérence d'un résultat, puis en tant qu'informaticien pour mettre en oeuvre (et parfois construire !) les outils lui permettant de surmonter le problème éventuel. Dans le même ordre d'idées, soulignons l'intérêt d'un oeil extérieur à celui du concepteur du logiciel, tant pour des aspects algorithmiques que d'autres liés à la cohérence de l'interface.

En bout de course, le code produit doit objectivement faire l'objet d'une certaine suspicion, levée pour tout ou partie par l'étape de la validation. Trois techniques distinctes de validation sont répertoriées, chacune étant capable de révéler des erreurs dans le processus global de modélisation [Judkoff 89]:

#### *Vérification analytique.*

Sur des cas simples, la comparaison des sorties du modèle avec l'expression analytique des solutions permet de détecter certains types d'erreurs dans les algorithmes. Dans cette démarche, chacune des entrées du modèles est tour à tour privilégiée, pour pouvoir interpréter rapidement les sources d'erreurs rencontrées.

#### *Comparaison de codes de calcul.*

Sur un même cas d'étude, cette démarche est très souple et permet de tester différentes parties. Elle est d'autant plus intéressante que le code avec lequel les comparaisons sont faites a été validé complètement. Bloomfield met l'accent sur un écueil rencontré par tous ceux qui ont lancé deux

simulations d'un même bâtiment à l'aide de deux codes différents. Avec le premier des codes, le simulateur part de la réalité physique du bâtiment et lui applique implicitement certaines simplifications ou hypothèses. Avec le second code, la même démarche est reproduite, mais en utilisant cette fois des modèles, des descriptions et des simplifications pouvant être très différentes. La validité de la comparaison peut alors être remise en cause. Par ailleurs, la double description d'un bâtiment complexe est une importante source d'erreurs.

### *Validation expérimentale.*

La comparaison des mesures et des résultats du modèle constitue la méthode de validation la moins discutable. Selon les conditions environnementales, la validation expérimentale est séparée entre celle "in situ" et celle en laboratoire. Elle fait apparaître toute une hiérarchie de possibilités dépendant des objectifs poursuivis par l'expérimentateur. Le champ balayé va ainsi du simple capteur de température disposé dans un local à la mesure du champ des vitesses au voisinage d'une ouverture. Mis à part certains cas simples, cette validation nécessite des moyens techniques et humains importants. D'autres problèmes sont aussi liés à la précision des mesures des paramètres d'entrée et de sortie.

Dans la classification précédente, un certain type de tests n'apparaît pas explicitement, que nous qualifierons de *bon sens*. Ils visent à s'assurer de la cohérence d'évolution de variables de sortie suite à certaines sollicitations. Par exemple, après la mise en route d'un système de chauffage, la température sèche intérieure doit croître ou encore décroître moins rapidement. Même s'ils paraissent sibyllins, ces tests réalisés au fur et à mesure de la complexification du code ont permis de détecter bon nombre d'erreurs.

A la classification duale précédente (validé, non validé), Brau préfère la notion de qualité de modèle, qui exprime le degré de confiance à accorder à un modèle global [Brau 80]. En effet, un modèle thermique de bâtiment est constitué de plusieurs modèles élémentaires, chacun d'entre eux pouvant

être intégré sans validation ou après avoir été validé indépendamment. Dans les deux cas, il n'est pas toujours aisé de juger de la validité de l'ensemble ainsi construit. Considérons un modèle simplifié d'un phénomène, s'accommodant de certaines hypothèses grossières. Si dans le bâtiment, l'incidence de ces hypothèses vis à vis du comportement de l'ensemble est minime, elles n'entacheront pas la validité du modèle global. Dans le cas général, les réponses à ces questions, faisant intervenir un nombre important de paramètres, ne peuvent être déterminées qu'à l'aide d'une démarche expérimentale.

Dans ce chapitre, nous ferons appel à chacune des méthodes précédentes pour ébaucher la validation de *CODYRUN*.

### 5.3. Amorce de la validation de CODYRUN :

#### 5.3.1. Comparaison avec un autre code de calcul : *CODYBA*

Conscient de la nécessité d'une certaine prudence vis à vis de la validation des codes entre eux, cette comparaison nous a permis de corriger certaines erreurs de *CODYRUN* et de disposer d'une certaine marge de confiance vis à vis de certains aspects tels que les sollicitations solaires, la réponse hygro thermique d'un bâtiment simple ou la prise en compte des charges internes.

Logiciel monozone développé par l'INSA de Lyon, *CODYBA* permet d'étudier le comportement thermique d'un bâtiment en régime variable [Roux 88] [Brau 92]. Permettant la prise en compte d'un système de traitement d'air, ce logiciel est à même de tester différentes modifications de conception ou d'équipement génératrices de meilleures performances énergétiques.

Avec la prise en compte des échanges sensibles et latents, différents modules sont proposés, permettant un accès aux paramètres de confort, d'ensoleillement des vitrages ou encore à des grandeurs liées à la réglementation (coefficient GV, ...). Vis à vis des modèles physiques des phénomènes, signalons que la conduction est intégrée à l'aide d'un modèle 2RC dans les parois extérieures et 2RC dans les parois internes (ou cloisons). La convection (intérieure, extérieure) ainsi que le rayonnement de grande longueur d'onde sont intégrés à l'aide de modèles linéaires à coefficients constants. La prise en compte des échanges d'air entre le bâtiment et l'extérieur est possible à l'aide d'un débit de ventilation, éventuellement modulé par un profil horaire.

Vis à vis de la résolution, le logiciel est basé sur l'analyse nodale et procède à l'agrégation des entités (parois opaques extérieures, vitrages extérieurs, cloisons et planchers). En raison des modèles conductifs de parois, l'étude d'un bâtiment quelconque se ramène à celle du réseau électrique de la figure 103, comportant 10 noeuds auxquels sont associés de numéros ayant la signification suivante :

Numéro	Signification : noeud ...
1	... extérieur de vitrage extérieur
2	... intérieur de vitrage extérieur
3	... extérieur de paroi opaque extérieure
4	... intérieur de paroi opaque extérieure
5	... de sol
6	... de plancher
7	... de surface intérieure de cloison
8	... interne de cloison
9	... de température sèche d'air intérieur
10	... de température radiante moyenne

Sur le schéma suivant, le numéro de ces noeuds de discrétisation, repérés par un rond blanc, est indiqué :

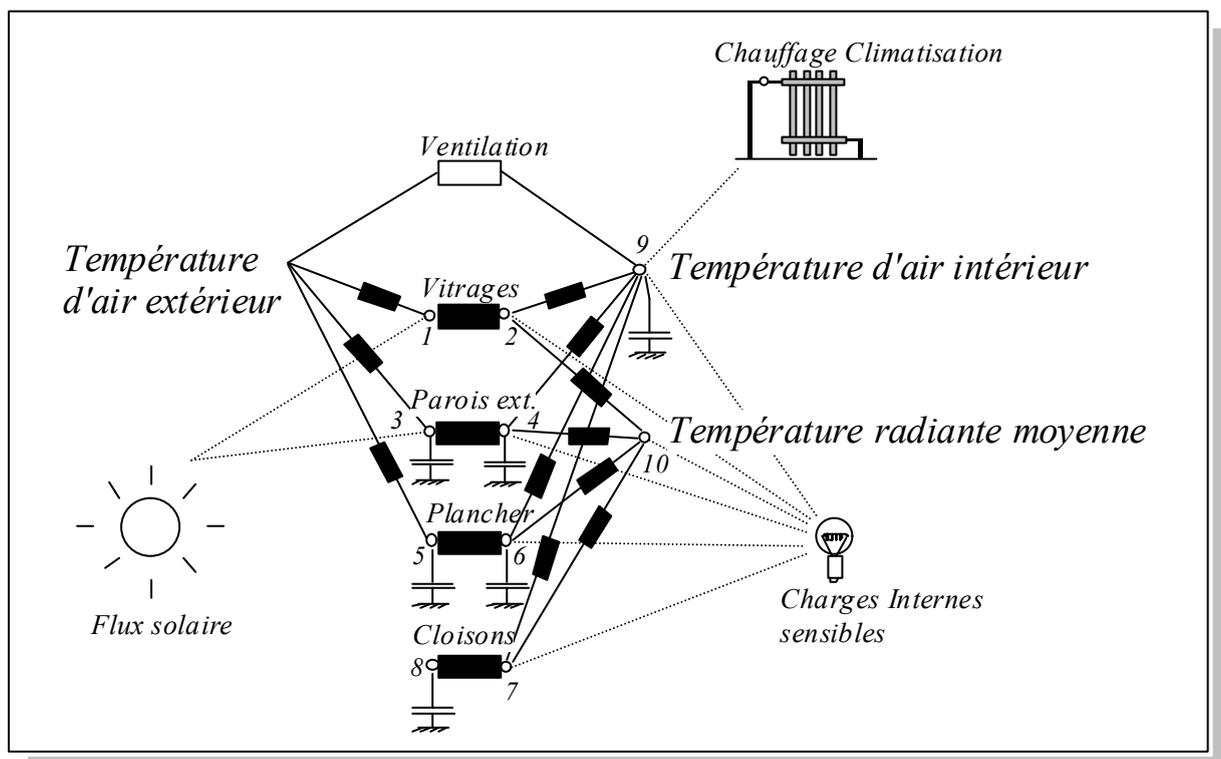


Fig 103 : Schéma analogique du modèle thermique de CODYBA

En marge de cette présentation, l'aspect nous intéressant plus directement est celui de la validation de ce logiciel, effectuée à l'INSA de Lyon à l'aide de la cellule MINIBAT. Le détail de la cellule et de ces équipements est disponible dans [Roldan 85]. De manière schématique, la cellule étudiée est entourée sur ces faces opaques de vides techniques dans lesquels la température de l'air est

imposable entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sur la façade vitrée constituant la sixième face de la cellule, un caisson climatique est associé à un simulateur d'ensoleillement.

Les mesures, disponibles dans [Roux 85], ont été effectuées pour des cas représentatifs des conditions généralement rencontrées dans les bâtiments, à savoir sur la face vitrée un échelon de température extérieure, un échelon de puissance convective intérieure et un échelon d'ensoleillement. Dans chacun de ces cas, la concordance entre le modèle et les mesures s'est avérée concluante.

#### 5.3.1.1. Déroulement des comparaisons :

Le cas choisi au départ est très simple, à savoir celui d'un bâtiment cubique de  $125\text{ m}^3$  et équipé d'un vitrage sur l'une des façades (Ouest). Ce bâtiment a été décrit avec *CODYBA* (au travers de fenêtres en mode texte) et avec *CODYRUN* au travers de notre interface. Un élément du menu Fichier (Importer) pourrait avantageusement convertir un fichier bâtiment au format *CODYBA*.

Ayant par ailleurs choisi pour *CODYRUN* le même format de fichiers météorologiques que pour *CODYBA*, l'avantage immédiat est de disposer des fichiers correspondant à plusieurs sites, dont les plus utilisés sont en France métropolitaine ceux de MACON et CARPENTRAS. A la liste des fichiers de sollicitations météorologiques disponibles, nous avons ajouté celui de LA REUNION, au départ d'une collecte de données effectuée par Gilles [Gilles 86].

Au niveau des modèles, nous avons sélectionné ceux choisis par *CODYBA*, à savoir pour les échanges superficiels des modèles à coefficients constants et le modèle 2RC pour les parois extérieures. Une différence notable entre *CODYRUN* et *CODYBA* a été signalée, concernant la globalisation des parois. *CODYRUN*, dans l'état d'avancement actuel, résoud un système de dimension plus importante. Cependant, en raison du caractère homogène des parois du bâtiment (toutes constituées de 12 cm de béton) et des modèles choisis, il est prévisible que cette globalisation n'affecte pas de manière significative les résultats.

Dans la logique d'une complexification progressive du problème, les premiers tests comparatifs ont été réalisés en régime permanent. [Brau 80], menant l'étude expérimentale d'une cellule d'habitation, souligne l'importance des résultats du régime permanent et l'intérêt de mener cette étude en préalable à toute étude en régime transitoire. Des fichiers météorologiques artificiels ont ainsi créés en vue de ces tests, permettant d'appliquer au bâtiment une ou plusieurs sollicitations constantes dans le temps.

En plus de la connaissance des paramètres géométriques (épaisseur des couches et surface des parois) et des sollicitations (température extérieure, ensoleillement, ...), le régime permanent est alors entièrement déterminé par la conductivité thermique des matériaux constitutifs de l'enveloppe. Pour mener à bien une comparaison, il est nécessaire de pouvoir mettre en oeuvre des matériaux identiques du point de vue thermo-physique. A ce moment, apparaît l'importance de disposer de bibliothèques de matériaux qui soient dynamiques (autorisant la modification et la création de nouveaux articles), ce qui se vérifie à la fois dans *CODYRUN* et *CODYBA*. Une comparaison de codes utilisés en Australie souligne l'importance de ce point [Ahmad 93].

Notre stratégie de test du régime dynamique a aussi été graduelle, en ajoutant successivement au bâtiment les composants mettant en oeuvre des modules à tester. Pour une séquence météorologique donnée, à savoir les quatre premiers jours du fichier de la Réunion, le tableau suivant donne la liste des simulations qui ont été effectuées avec chacun des deux codes de simulation :

Cas	Configuration	Objet du test	Variables comparées
A	Bâtiment initial	Evolution libre du système thermique	Température sèche Température radiante
B	+ Système de climatisation sensible	Algorithme de régulation sensible	Température sèche Puissance sensible
C	+ Bouche de ventilation	Système Hygro thermique	Température sèche Humidité intérieure
D	+ Profil de ventilation	Intégration des profils	Température sèche Humidité intérieure
E	+ Système de climatisation sensible	Algorithme de régulation latente	Humidité intérieure Puissance latente
F	+ Charge interne sensible	Prise en compte des charges internes sensibles	Température radiante Puissance sensible
G	+ Charge interne latente	Prise en compte des charges internes latentes	Humidité intérieure Puissance latente

### 5.3.1.2. Quelques résultats :

Nous ne passerons pas en revue l'ensemble des tests effectués. Pour illustrer la comparaison, nous nous intéressons à certaines courbes obtenues pour le cas G. Les courbes de la page suivante tracent alors les évolutions obtenues pour les quatre premiers jours du fichier de la station de la Réunion.

Pour le bâtiment, nous avons intégré un système de climatisation, d'une puissance d'un kW et dont le seuil de déclenchement vaut 27 °C. Au vu de la courbe de la température sèche intérieure et de la puissance sensible appelée, il est notable que cette puissance est insuffisante pour compenser les apports au travers de la baie vitrée se produisant au cours de l'après-midi. Les pics observables (en température et puissance sensible) chaque jour correspondent à une charge interne sensible de 2 kW, mise en oeuvre chaque jour entre 11 h et 12 h. (pouvant par exemple correspondre à l'ouverture d'un four). La partie latente du système de climatisation est équipée d'une puissance suffisante pour maintenir une humidité relative intérieure supérieure ou égale à 75 %.

Plus en détail dans notre stratégie de test, la concordance n'a pas été atteinte dès les premières simulations, ce en raison du non report accidentel d'une des hypothèses de modélisation de *CODYBA* dans *CODYRUN*. Un écart notable entre les températures sèches subsistait alors. Pour expliquer cet écart, différents essais ont été menés pour le corrélérer avec l'une des variables du fichier de sollicitations. Finalement, le tracé simultané de la température du ciel et de l'écart nous a permis d'identifier l'intégration des échanges radiatifs extérieurs de grande longueur d'onde comme source de différence entre les deux codes. *CODYBA* considère en effet la température du ciel égale à celle de l'air extérieur.

Les figures 104 à 106 témoignent d'une très bonne concordance des résultats entre les deux codes. Ainsi, vis à vis des températures, l'écart est de l'ordre de deux dixièmes de degrés et de quelques dizaines de Watts pour les puissances sensibles et latentes.

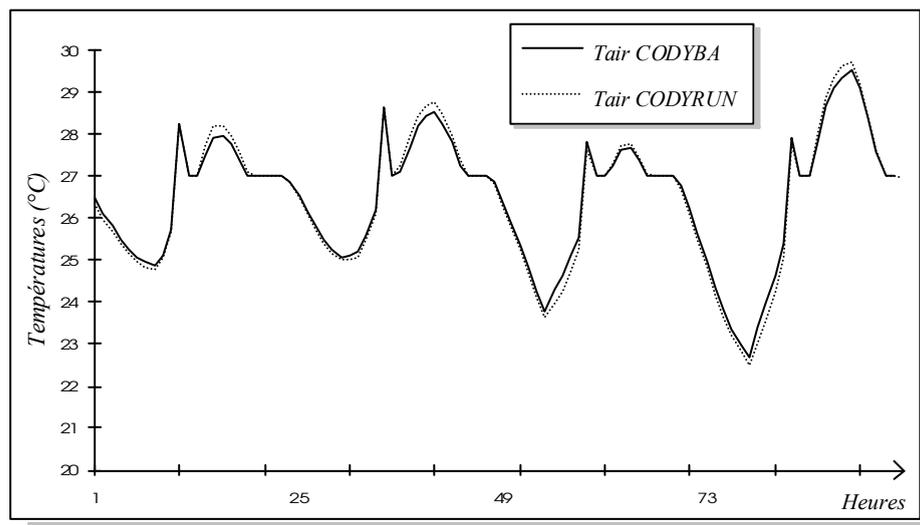


Fig. 104: Comparaison de l'évolution des températures sèches intérieures

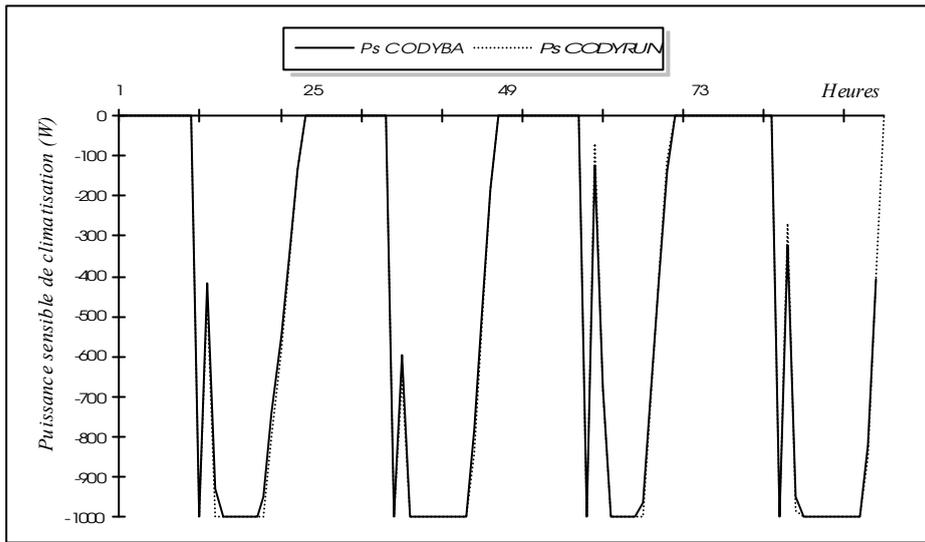


Fig. 105: Comparaison de puissances sensibles appelées

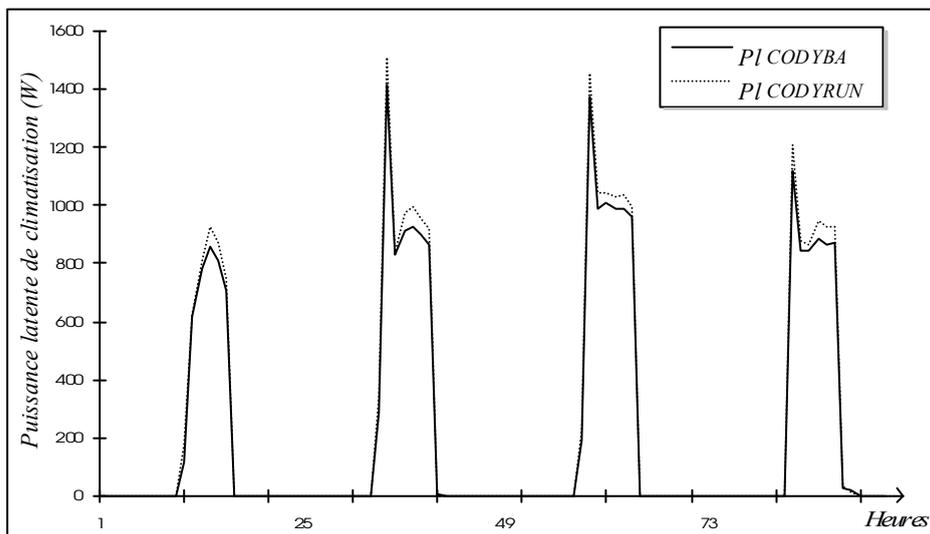


Fig. 106 : Comparaison des puissances latentes appelées

### 5.3.2. Considérations sur les transferts d'humidité :

Bien que disposant d'une certaine garantie de fiabilité après les tests précédents, nous allons illustrer pour les transferts d'humidité les tests de cohérence que nous avons réalisés tout au long du développement de *CODYRUN*. Le cas est celui d'un local auquel sont associées deux bouches de ventilation, l'une de soufflage et l'autre d'extraction, d'un même débit horaire.

#### 5.3.2.1. Régime impulsif :

Nous considérons un fichier météorologique correspondant à un régime permanent. Il est constitué de telle façon que l'ensoleillement et le vent soient nuls, alors que la température extérieure, constante, est égale à la température d'initialisation du bâtiment. Par ailleurs, l'humidité relative extérieure est fixée à 90 % pour la journée.

Notre but est ici de tracer l'évolution de l'humidité intérieure pour une journée de simulation, pour différents taux de renouvellement de l'air intérieur. Nous avons associé aux deux bouches de ventilation un même profil horaire, modulant en conséquence le débit de renouvellement. Le débit est alors nul, de 0 à 3 heures.

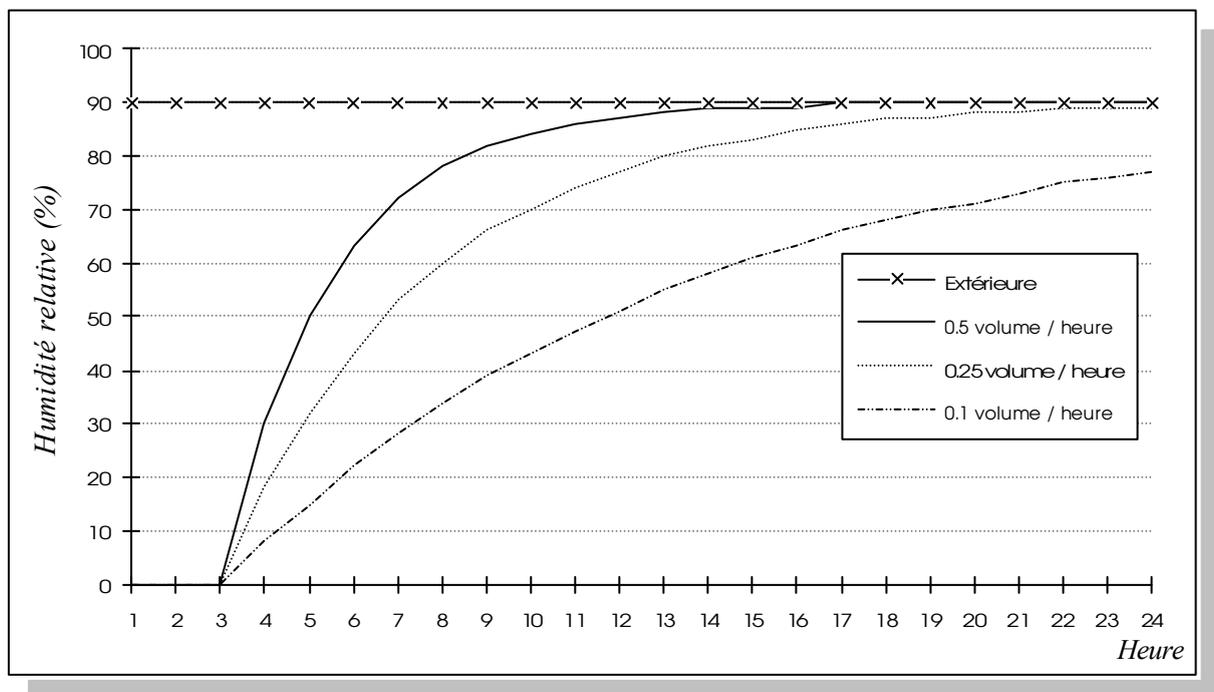


Fig. 107 : Evolution des humidités relatives, régime impulsif

Les courbes précédentes représentent la réponse en humidité relative du bâtiment lorsque ce dernier est soumis à une sollicitation de type échelon. Une certaine cohérence est manifeste, l'humidité intérieure tendant asymptotiquement vers celle extérieure, et ce d'autant plus rapidement que le débit de ventilation est important.

#### 5.3.2.2. Régime dynamique :

Pour les deux premiers jours du fichier météorologique de la station de la Réunion, l'évolution de l'humidité relative extérieure est tracée sur la figure 108. L'humidité intérieure est liée à l'humidité extérieure au travers du débit de renouvellement, mais aussi à la température intérieure, laquelle peut être très différente de celle extérieure. Pour pouvoir mieux comparer les humidités extérieure et intérieure, nous avons utilisé un artifice permettant d'égaliser les températures intérieure et extérieure. Il s'agit de la prise en compte d'un système de traitement d'air sensible, disposant de puissances importantes et tel qu'à chaque instant, sa consigne en température égale celle de l'air extérieur. S'il est totalement fictif, ce système est très utile dans les tests, car il permet de s'affranchir du tirage thermique et dans le cas présent de la dépendance de l'humidité relative avec la température.

Avec ce système, une simulation utilisant un taux de renouvellement d'un volume horaire permet effectivement de retrouver à l'intérieur une humidité relative égale à celle de l'extérieur. Pour différentes valeurs du taux de renouvellement d'air, les courbes suivantes sont celles données par *CODYRUN*.

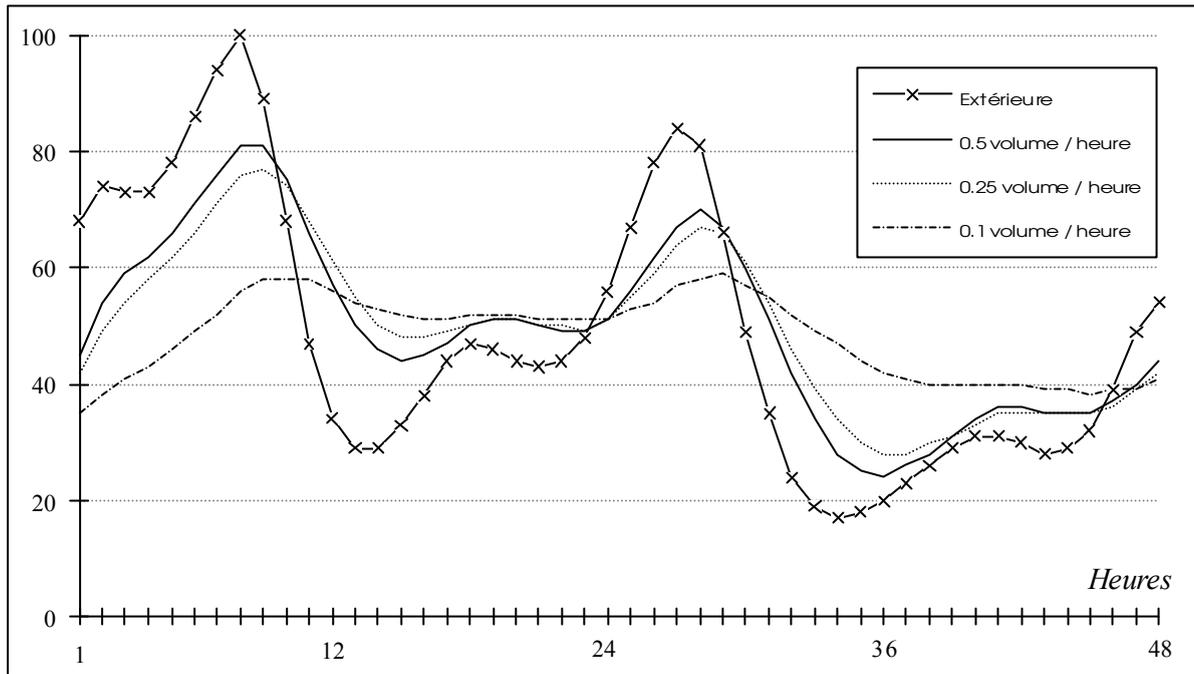


Fig. 108 : Evolution des humidités relatives, régime dynamique

Quand le débit augmente, l'humidité intérieure est conditionnée par celle extérieure. Dans le cas de faibles débits, c'est le phénomène de stockage (ou de destockage) de la vapeur d'eau dans le volume d'air du local qui est prédominant. Ces constatations sont tout à fait conformes à nos prévisions.

### 5.3.2.3. Analogie électrique :

Les tendances des courbes précédentes se retrouvent aisément à l'aide de l'analogie électrique, suggérée par l'écriture du bilan latent du local considéré. Le bilan simplifié s'écrit, en l'absence de charges internes :

$$m_{as} lv \frac{d r_{sint}}{d t} = \dot{m}_{ent} lv r_{sext} - \dot{m}_{sor} lv r_{sint}$$

L'analogie avec un bilan électrique est possible en assimilant l'humidité spécifique à un potentiel électrique. Le terme  $(\dot{m}_e lv)$  joue alors le rôle d'une conductance. En raison de l'égalité des débits massiques entrants et sortants, le problème répond alors au schéma électrique de la figure 109 :

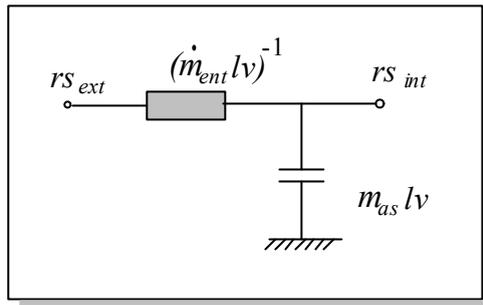
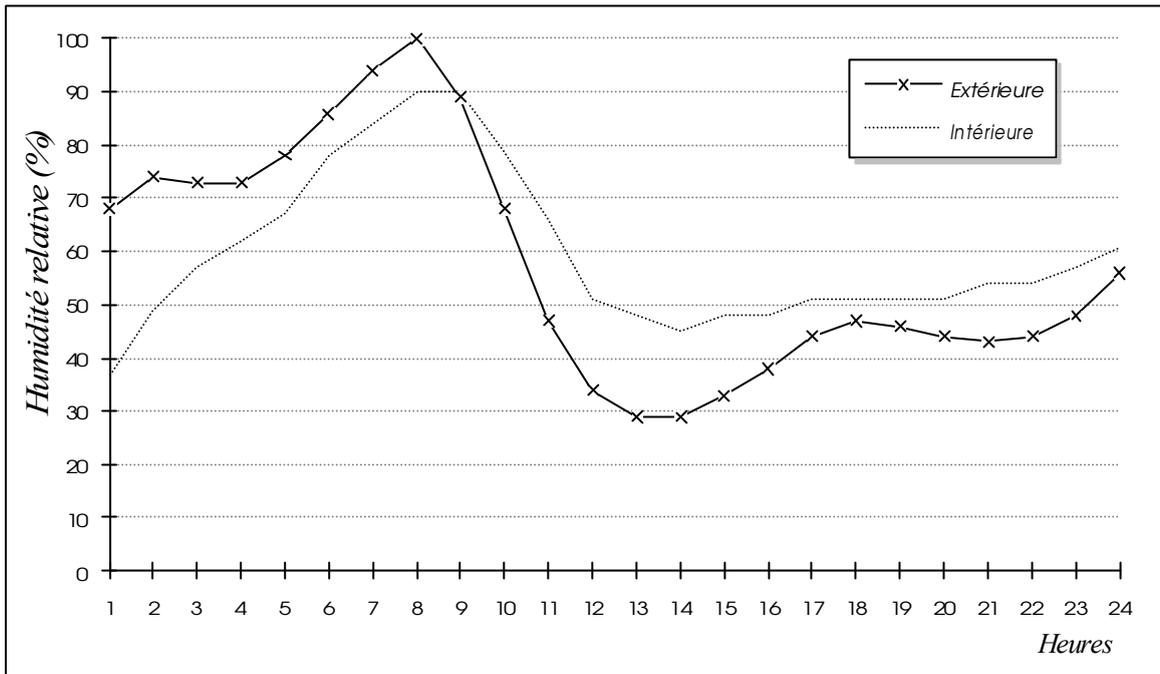


Fig. 109 : Modèle analogique des transferts d'humidité spécifique

Les règles bien connues de fonctionnement d'un filtre RC passe bas ainsi constitué s'appliquent alors. Ainsi, si la résistance augmente, la fréquence de coupure du filtre diminue. A ce moment, supprimant la partie haute fréquence du signal d'entrée, la sortie est sensiblement déphasée et surtout amortie. En revenant en termes liés à notre problème physique, la diminution du débit de renouvellement amortit les variations de l'humidité extérieure. A ce moment, l'effet dominant est celui de l'inertie du volume d'air humide.

Vis à vis de la seule variable humidité, le bâtiment ventilé mécaniquement possède une fonction de transfert qui a la particularité d'être modulée par les débits de ventilation. En fonction d'objectifs de confort (consignes en humidité par exemple) et réglementaires (débit hygiénique de renouvellement d'air), un algorithme pourrait déterminer la commande des bouches de ventilation pour optimiser l'évolution libre de l'humidité intérieure ou encore la puissance de climatisation latente commandée.

En reprenant les courbes précédentes, en faisant abstraction de la température, supposons que la consigne basse en humidité relative intérieure soit de 45 %. Avec un asservissement tout ou rien (0 ou 0.5 volume / heure), pour la première journée, il est clair qu'il faut stopper le système de ventilation à partir de midi. En modifiant en conséquence le profil associé, la courbe obtenue est la suivante :



*Fig. 110 : Evolution comparée de l'humidité extérieure et intérieure*

Le résultat pratique ne saurait être aussi intéressant, en raison du couplage entre température et humidité, lequel est occulté par l'artifice utilisé pour ne considérer que les phénomènes liés au transport d'humidité.

### 5.3.3. Les tests aérauliques :

Le test du module aéraulique est problématique, ne disposant pas d'un autre code de calcul pour comparer les résultats. Par ailleurs, les résultats de campagnes de mesures dont nous disposons ne nous permettent pas de comparaison, en raison de l'absence d'une description complète du cas d'étude et/ou des sollicitations météorologiques. Pour parer à ce manque, nous avons tout d'abord effectué un certain nombre de tests de cohérence, mettant par exemple en évidence l'incidence de la taille des ouvertures ou du choix des exposants d'écoulement sur les débits. Ensuite, disposant ailleurs des expressions analytiques des débits massiques pour des cas simples (monozones) en régime permanent, nous avons vérifié que les valeurs correspondantes sont bien celles fournies par *CODYRUN*. Pour ce faire, nous avons créé (à l'aide d'un éditeur de texte) des fichiers météorologiques permettant d'appliquer certaines sollicitations au bâtiment. Pour tester la prise en compte du tirage thermique, nous avons utilisé la possibilité d'imposer une température sèche dans le bâtiment à l'aide d'un système de climatisation disposant de puissances sensibles importantes, permettant d'assurer le respect de la consigne désirée.

Le bâtiment de base, qui ne se veut pas réaliste, est cubique et constitué d'une enveloppe de béton de 12 cm d'épaisseur, et de 125 m<sup>3</sup> de volume.

#### 5.3.3.1. Tirage thermique au travers d'une petite ouverture :

Le fichier météorologique est constitué de la façon suivante : ensoleillement et vent nuls, température de l'air extérieur constante et égale à 25 °C. Au bâtiment de base, un système de climatisation est adjoint, maintenant une température sèche de 0°C, et deux petites ouvertures sont pratiquées dans l'une des inter ambiances extérieures, l'une à 0.5 m et l'autre à 2.5 m de côte. Pour chacune d'elles, les paramètres liés à l'écoulement ont été vus lors du chapitre IV (modèle aéraulique) et sont la perméabilité (0.5), le coefficient de décharge (0.5) et l'exposant de l'écoulement (0.67).

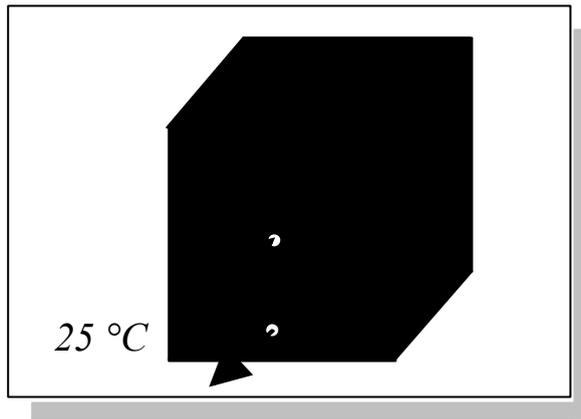


Fig. 111 : Croquis du bâtiment et disposition des deux petites ouvertures

L'expression analytique du débit massique traversant chacune des petites ouvertures est la suivante, l'établissement de la relation étant reporté en annexe E :

$$\dot{m} = \rho_{ae} K \left( \frac{P_{ae} - P_{ai}}{2} \right) g (z_1 - z_2)$$

Pendant l'initialisation du bâtiment, un régime permanent s'établit, et les débits massiques alors constants égalent sensiblement la valeur fournie par l'expression précédente, c'est à dire 0.64 kg/s, avec les valeurs correspondant à notre cas. Rappelons que le module aéraulique que nous avons implémenté ne calcule pas le débit à partir de l'équation précédente, mais qu'il part des pressions initiales pour calculer chacun des débits. Pour obtenir un bilan massique nul, des corrections sont apportées aux pressions précédentes, permettant une nouvelle approximation des débits massiques. Le processus se répète alors jusqu'à convergence.

En raison du caractère permanent des sollicitations, il n'y a d'itérations du système aéraulique que pour le premier pas de temps. Nous avons, lors de la partie informatique, évoqué la possibilité pour *CODYRUN* de tracer certaines variables fort utiles en mise au point du logiciel ou vis à vis d'une analyse plus fine des phénomènes. Dans le cas d'une description monozone, le vecteur des termes correctifs (appliqués aux pressions à chaque itération) se ramène à un scalaire. Pour le premier pas de temps, nous allons tracer l'évolution de ce terme correctif en fonction du nombre d'itérations. Suite à plusieurs simulations correspondant à différentes valeurs du coefficient de relaxation, les courbes suivantes peuvent être tracées :

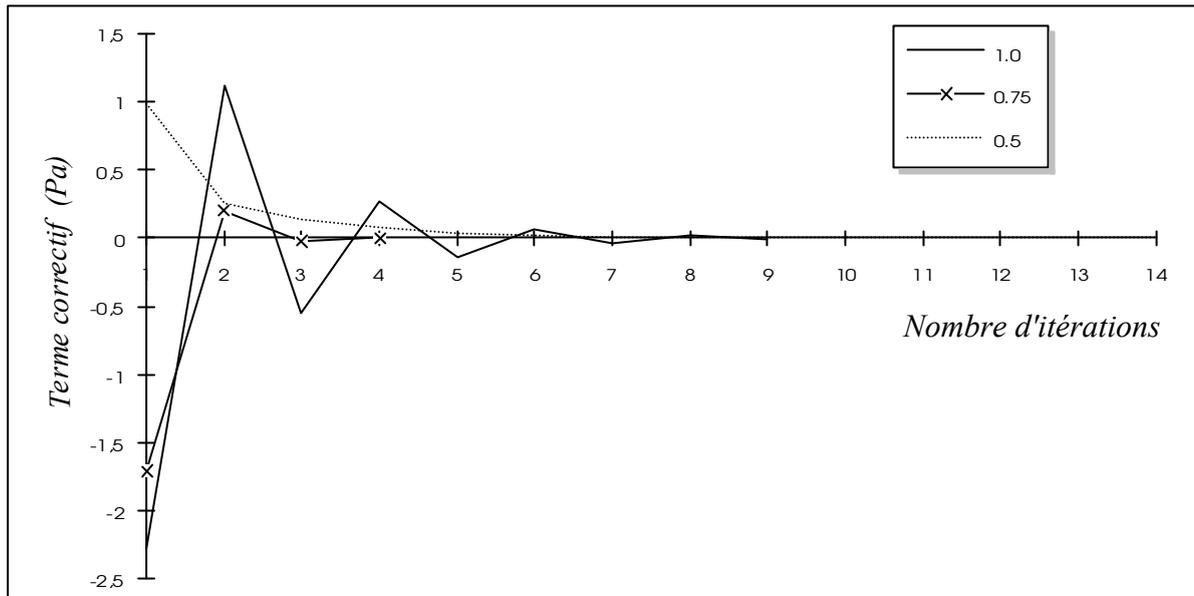


Fig. 112 : Evolution du terme correctif pour différentes valeurs du coefficient de sous relaxation

Sur ce cas pourtant simple, la difficulté du choix d'un coefficient de relaxation est déjà claire. Rappelons que la démarche optimisée nécessite à chaque itération le calcul du coefficient de relaxation conduisant à une rapidité de convergence plus grande et accessoirement à une meilleure probabilité de convergence.

### 5.3.3.2. Vent et VMC :

D'autres tests sont réalisables, en combinant les effets du vent et de la ventilation mécanique. Plutôt que de réaliser des tests séparés (à la manière du précédent), nous allons tester ces différents cas sur un même bâtiment, en combinant des séquences météorologiques différentes. La première partie du fichier météorologique est la même que celle précédente, pour les six premières heures. Un vent plein Sud, de vitesse 2 m/s intervient tout au long de la journée de simulation. Pour tester l'influence de la ventilation mécanique, une bouche VMC extrait 3000 m<sup>3</sup>/h. Dans le but d'observer différents régimes de fonctionnement, au débit volumique est associé un profil horaire, nul avant 7 heures (pour tester la seule influence du vent, égal à 10 % avant 13 heures, 100 % jusqu'à 18 h et nul pour le reste de la journée. L'écran reproduit sur la figure 113 est celui permettant la saisie du profil précédemment défini.

**Profils de débits, Journée de type Semaine**

Intitulé du profil :

0- 1 h :	<input type="text" value="0"/>	6- 7 h :	<input type="text" value="10"/>	12-13 h :	<input type="text" value="100"/>	18-19 h :	<input type="text" value="0"/>
1- 2 h :	<input type="text" value="0"/>	7- 8 h :	<input type="text" value="10"/>	13-14 h :	<input type="text" value="100"/>	19-20 h :	<input type="text" value="0"/>
2- 3 h :	<input type="text" value="0"/>	8- 9 h :	<input type="text" value="10"/>	14-15 h :	<input type="text" value="100"/>	20-21 h :	<input type="text" value="0"/>
3- 4 h :	<input type="text" value="0"/>	9-10 h :	<input type="text" value="10"/>	15-16 h :	<input type="text" value="100"/>	21-22 h :	<input type="text" value="0"/>
4- 5 h :	<input type="text" value="0"/>	10-11 h :	<input type="text" value="10"/>	16-17 h :	<input type="text" value="100"/>	22-23 h :	<input type="text" value="0"/>
5- 6 h :	<input type="text" value="0"/>	11-12 h :	<input type="text" value="10"/>	17-18 h :	<input type="text" value="100"/>	23- 0 h :	<input type="text" value="0"/>

Profils constants

<input type="button" value="100 %"/>	<input type="button" value="75 %"/>	<input type="button" value="50 %"/>	<input type="button" value="25 %"/>	<input type="button" value="0 %"/>
--------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

*Fig. 113 : Fenêtre des profils horaires*

Pour réaliser ce test, l'une des deux petites ouvertures du bâtiment précédent est disposée sur l'inter-ambiance avec le Sud et l'autre au Nord. Pour ne considérer que les effets du vent et de la VMC, la température intérieure sèche est maintenue égale à celle de l'air extérieur, c'est à dire 25 °C. *CODYRUN* permettant optionnellement le tracé des débits massiques, nous reproduisons ci-après les différents débits dont le bâtiment est le siège.

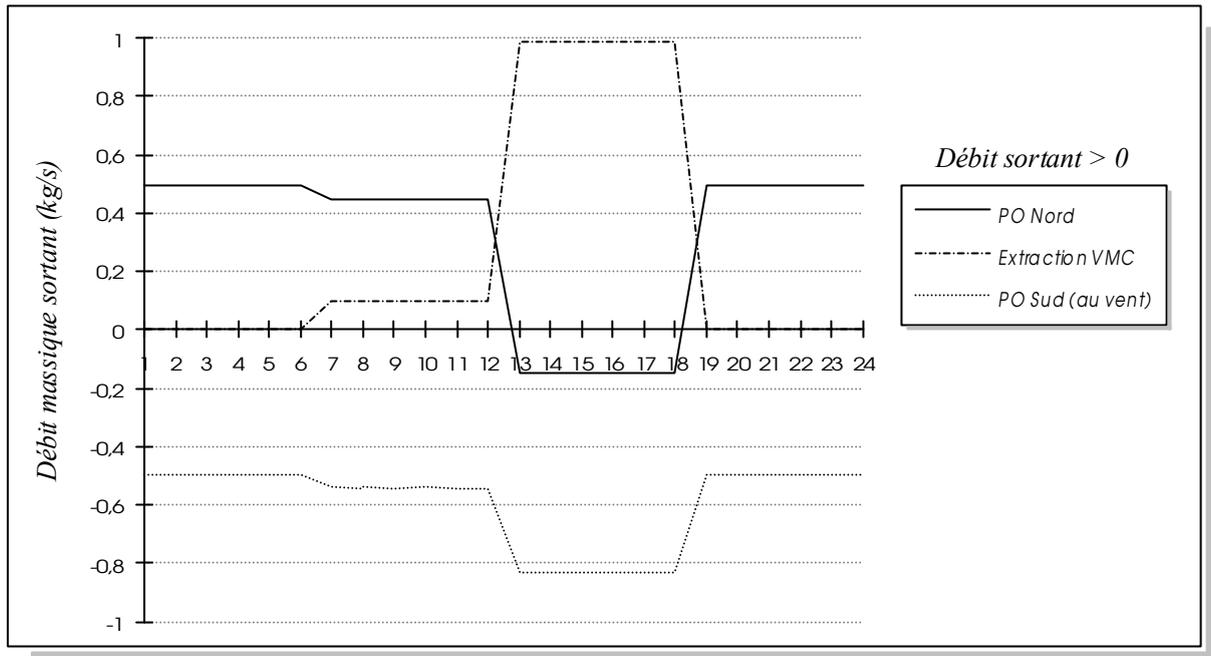


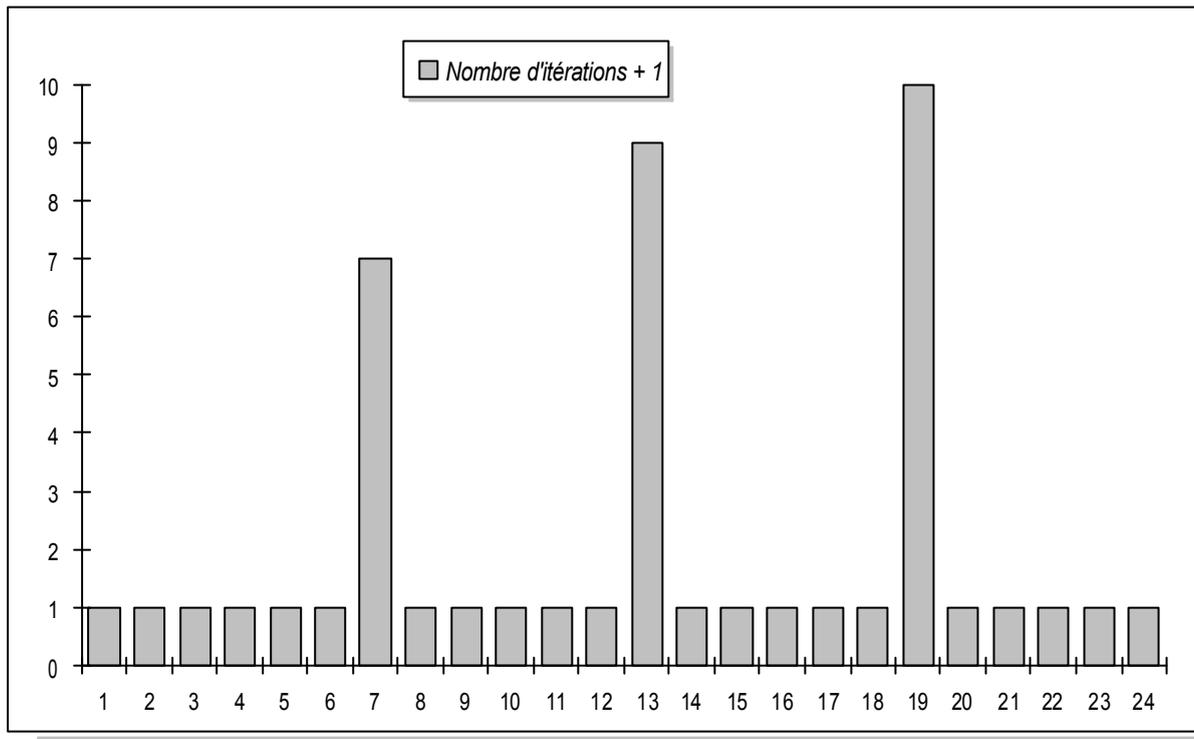
Fig. 114 : Evolution des débits massiques pour les petites ouvertures et la VMC

Les courbes précédentes font apparaître trois différentes plages de fonctionnement.

- 0- 6 h et 19 - 24 h : En l'absence de ventilation mécanique (et de tirage thermique en raison de la consigne choisie), les débits au travers des petites ouvertures sont dus au vent. Notre convention de signe affectant un signe positif aux débits sortants, celui au travers de l'ouverture sud est négatif. De l'air va en effet pénétrer dans la pièce par l'ouverture au vent. Vis à vis du calcul, le coefficient de pression associé à l'inter ambiance avec le Sud est positif.
- 7 - 12 h : Dans ce cas, le débit d'extraction (0.108 kg/s) est faible par rapport à ceux précédents. La bouche de ventilation ne modifie que faiblement la pression intérieure. L'extraction d'air crée une dépression dans la pièce, ce qui tend à accroître (en valeur absolue) le débit entrant et donc à diminuer le débit sortant.
- 13 - 18 h : En raison de l'importance du débit extrait, la bouche de ventilation impose la pression intérieure. La dépression est telle qu'il se crée un appel d'air au niveau de l'ouverture sous le vent (en dépression), inversant donc le sens du débit de l'ouverture Nord.

Dans chacun des cas, la concordance avec les expressions analytiques de l'annexe E est très bonne.

Illustration du fonctionnement numérique de la résolution, nous avons tracé pour la même période de simulation le nombre d'itérations nécessaire à la procédure de résolution du système aéraulique. Le nombre des itérations dépend bien sûr du critère de convergence choisi, mais la forme de la courbe reste la même.



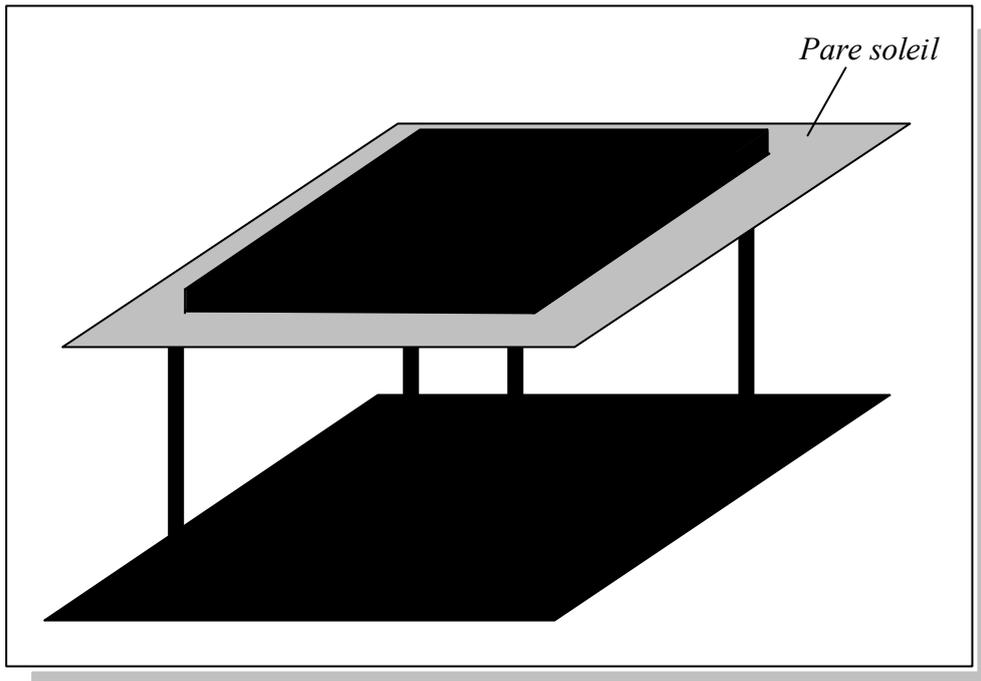
*Fig. 115 : Evolution horaire du nombre d'itérations*

A chaque perturbation induite par la ventilation mécanique (soit à 7, 13 et 18 h), la pression intérieure évolue et plusieurs itérations sont nécessaires. Exception faite des heures précédentes, les sollicitations n'évoluant pas, il n'est pas nécessaire d'itérer. La variable tracée étant en fait le nombre de passages dans la procédure de résolution (soit le nombre d'itération incrémenté d'une unité), la valeur affichée est alors 1.

### **5.3.4. Comparaison avec des mesures :**

#### 5.3.4.1. Le bâti expérimental :

L'expérimentation a été menée à l'Université de la Réunion entre 1988 et 1991 et porte sur des échantillons de toitures spéciales, soumis aux conditions météorologiques locales. L'intérêt de ces mesures était de disposer de grandeurs permettant de caractériser des toitures utilisées dans l'habitat tropical et utiles aux concepteurs locaux tels que l'amortissement, le déphasage ou le facteur de transmission solaire. Pour certaines d'entre elles, les matériaux constituant ou les particularités de l'assemblage des couches rendaient difficile la détermination d'une conductibilité apparente. Les échantillons, au nombre de 8, ont fait l'objet de campagnes de mesures, donnant principalement les flux sortants en sous face de toiture. Une comparaison de ces mesures était ensuite effectuée avec les résultats fournis par un modèle analytique de parois multicouches. La constitution des différentes des toitures étudiées et le protocole de mesures se trouvent dans la thèse issue de ces travaux [Tourrand 91]. La mesure des flux de chaleur était réalisée à l'aide de fluxmètres plans, réalisés au Laboratoire de Thermique et d'Energétique Solaire et constitués d'une plaque de polypropylène de faible résistance thermique fixée jointivement sous l'échantillon de toiture à tester. De part et d'autre de cette plaque, sont disposés des thermocouples, montés en série, permettant après étalonnage, une mesure du flux traversant.



*Fig. 116 : Le bâti expérimental.*

Simultanément au flux sortant, des mesures liées aux sollicitations météorologiques ont été faites, nous permettant ainsi de reconstituer un fichier météorologique d'entrée pour *CODYRUN*.

#### 5.3.4.2. La modélisation du dispositif de mesure :

Conçu comme un outil d'aide à la conception de bâtiments, *CODYRUN* permet aussi de considérer certains aspects de type recherche, tel que la reproduction du dispositif de mesure de la figure 116. Pour simuler la toiture considérée, cette dernière est supposée être celle du bâtiment fictif de la figure 117, dont les autres parois sont constituées de polystyrène de dix centimètres d'épaisseur, et d'une surface égale à celle de l'échantillon [Tourrand 93]. Le schéma suivant, auquel il manque la paroi frontale, détaille ce bâtiment :

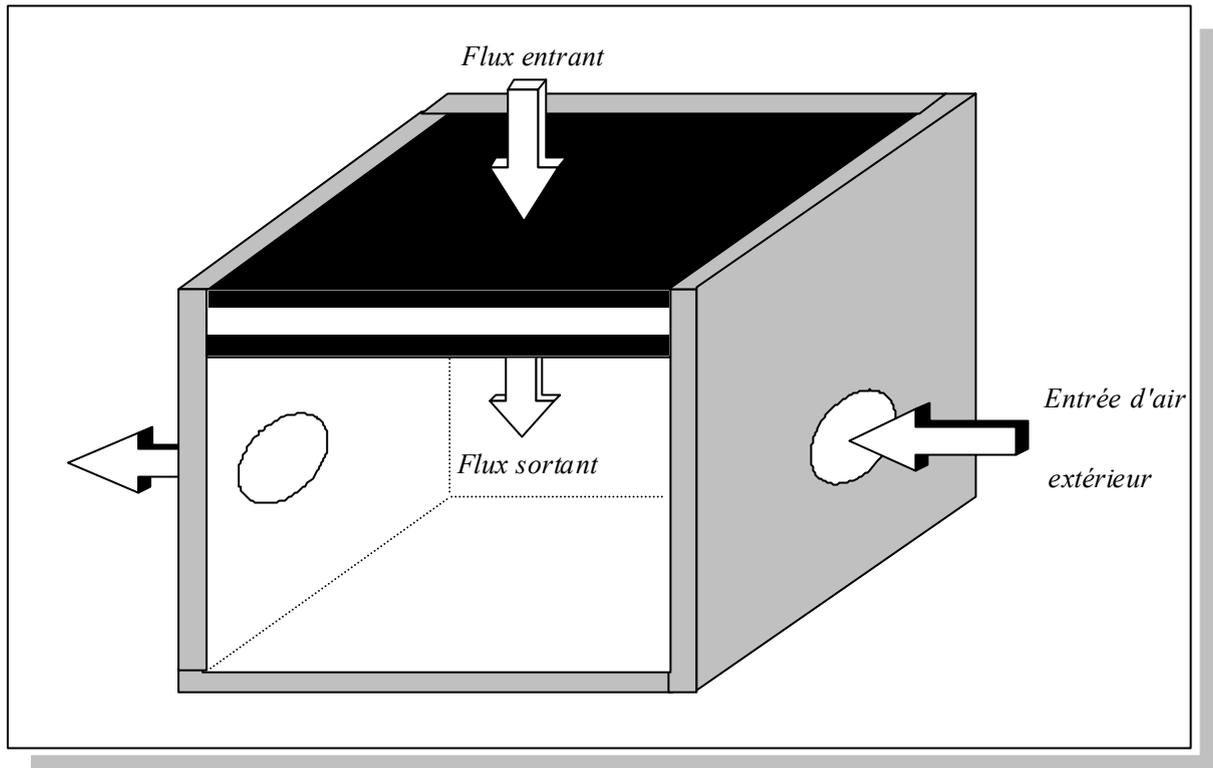


Fig. 117 : Schématisation du dispositif de mesures

En marge de ce modèle géométrique, par rapport à la face inférieure de l'échantillon, les conditions du dispositif à reproduire concernent la température d'air et les échanges radiatifs intervenant au niveau de la sous face de l'échantillon :

- Pour égaler les températures sèches d'air de part et d'autre de l'échantillon, deux solutions étaient envisageables : la première consistait à placer dans la zone ainsi constituée un système de traitement d'air dont la consigne égale à chaque pas de temps la température sèche de l'air l'extérieur. Nous avons utilisé une méthode qui tire parti des modèles aérauliques proposés par le logiciel. C'est ainsi que nous avons imposé à l'aide de deux bouches de ventilation des débits d'air, l'un entrant, l'autre sortant et algébriquement égaux. Pour peu que ces débits horaires soient très importants devant le volume de notre zone, l'évolution de température de l'air intérieur est la même que celle de l'extérieur.
- Vis à vis des courtes longueurs d'onde, l'environnement immédiat du bâti, à l'ombre, ne reçoit donc que tout ou partie de la composante diffuse du rayonnement solaire, faible étant donné que les journées de simulation choisies correspondent à des journées de beau temps. Par ailleurs, cet environnement constitué de béton non peint présente dans le domaine des courtes longueurs d'onde

un coefficient de réflexion faible. Nous donc avons dans notre simulation négligé les apports de rayonnement solaire dans la zone, qui auraient traduit une entrée de flux au niveau de la sous face de l'échantillon.

- Les échanges de grande longueur d'onde sont plus problématiques, ces derniers dépendant de la température de l'environnement du bâti. Ce système n'étant tout d'abord pas directement éclairé par le soleil, les conditions de ventilation étant par ailleurs bonnes pour la journée considérée, nous supposons la température radiante moyenne peu différente de celle de la température de l'air. Nous vérifierons que la zone que nous avons définie nous permet de retenir cette hypothèse.

Un point particulier est à souligner au niveau de la modélisation des transferts conductifs dans la paroi nous intéressant. Désirant obtenir des réponses en flux afin de les comparer avec des mesures, le niveau de finesse du modèle conductif doit être compatible avec l'objectif de la simulation. Il est ainsi prévisible qu'un modèle simplifié tel que celui disposant deux noeuds de discrétisation de la paroi en surface ne convient pas. En effet, avec ce modèle, la capacité de thermique est répartie entre ces deux noeuds, alors que physiquement, la capacité thermique des noeuds surfaciques est très faible. Le caractère multimodèle du logiciel est ici mis à profit, en sélectionnant parmi les modèles conductifs proposés un modèle plus fin que le précédent, disposant dans chacune des couches constitutives de la paroi un nombre de noeuds élevé (10 dans notre cas). L'application sélective des modèles est aussi illustrée ici, avec l'utilisation dans la toiture d'un modèle conductif détaillé, et pour les autres parois d'un autre simplifié (R2C).

Pour les flux convectifs en sous face, nous avons utilisé la possibilité fournie par le logiciel de renseigner une valeur du coefficient d'échange convectif intérieur. Pour tenter de reproduire les conditions expérimentales, nous avons choisi une valeur élevée pour le coefficient d'échange intérieur, à savoir  $11.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

#### 5.3.4.3. Les résultats :

Les courbes suivantes concernent un échantillon de toiture paille sur contre-plaqué. Ainsi que l'attestent les courbes suivantes, la comparaison des densités de flux sortant mesurées et modélisées à l'aide de *CODYRUN* dénote une bonne correspondance globale. C'est ainsi que les grandeurs fondamentales liées à la réponse thermique de la toiture, telles que l'amortissement et le déphasage sont bien reproduites. Sur ce cas précis, nous constatons que le modèle rend en particulier bien compte des phénomènes de discontinuité constatés lors des mesures.

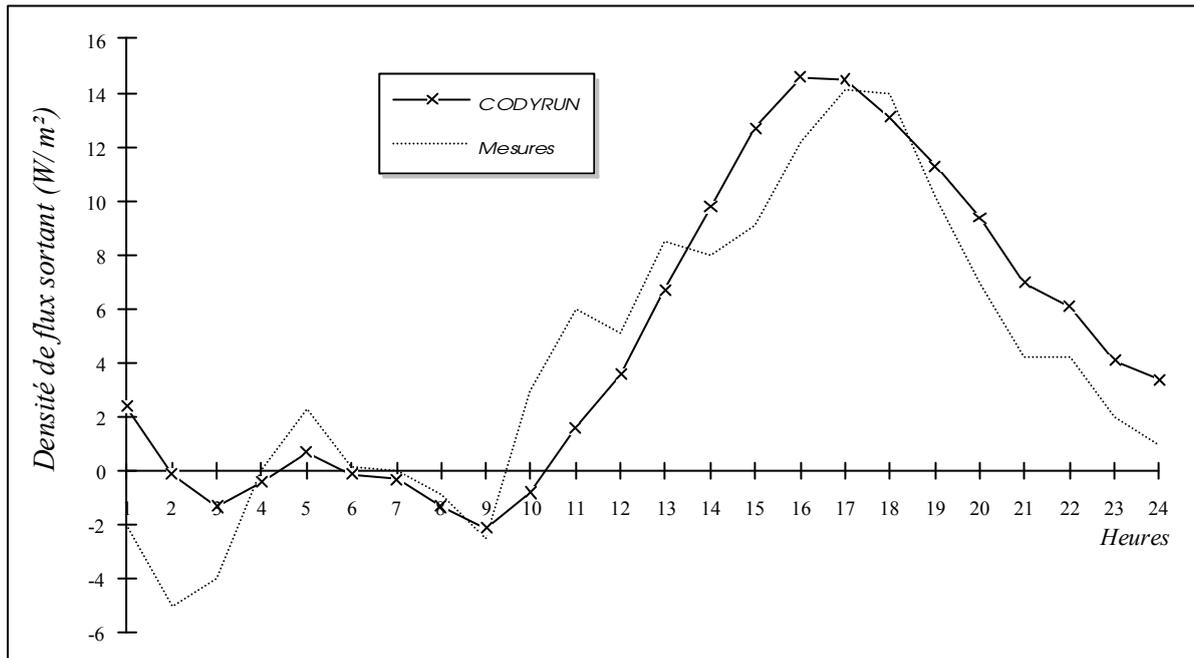


Fig. 118 : Evolution comparée de la densité de flux sortant (mesuré et modélisé)

Cependant, sur la courte durée de simulation que constitue la journée, notre modèle ne reproduit pas une variation assez importante du flux sortant, en début d'après midi. Il est possible que nous n'ayons pas pris en compte un flux parasite entrant (venant donc en diminution du flux sortant), ce en sous face du dispositif expérimental. Une autre explication pourrait être que, entre 14 et 16 heures, le pare soleil n'occulte pas totalement le rayonnement solaire. A ce moment, une partie de ce rayonnement serait absorbée en sous face du dispositif de mesure. Avec cette hypothèse, nous aurions pu corriger l'écart en intégrant dans la zone fictive une charge interne (de type éclairage) et associée à un profil horaire. Pour ce dernier, tous les pourcentages le constituant seraient nuls, à l'exception des points 14, 15 et 16 heures.

Sans cette hypothétique correction, la courbe suivante trace l'évolution de l'écart entre les densités de flux sortants mesurés et modélisés :

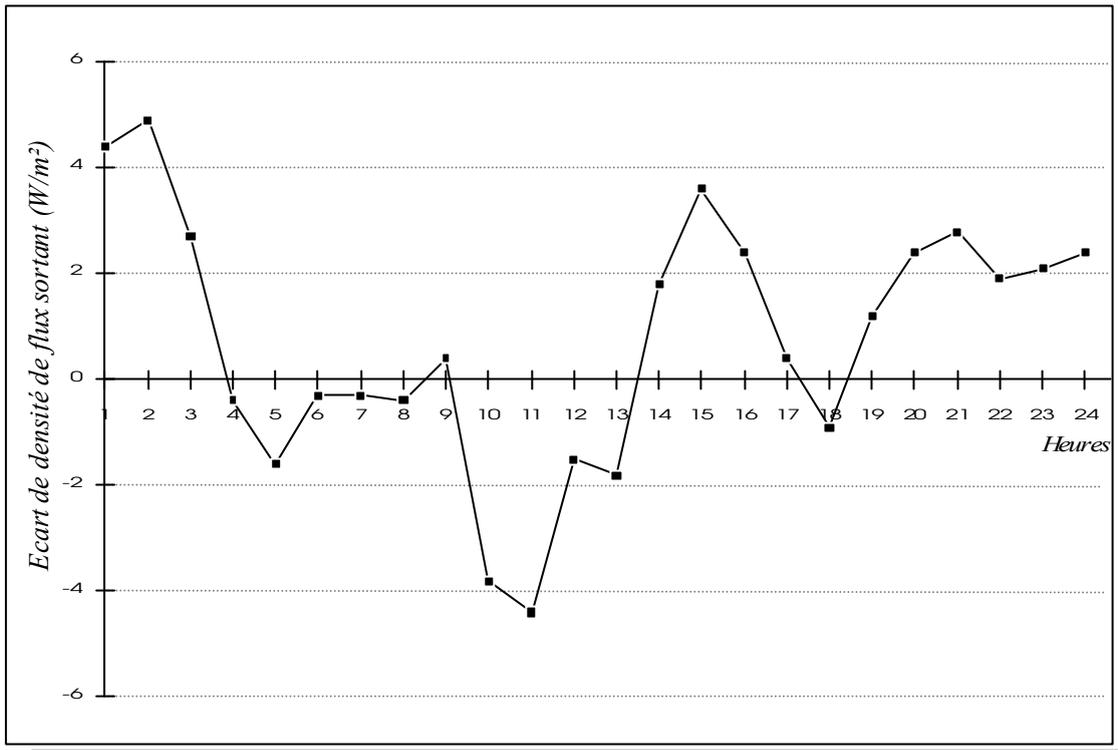


Fig. 119 : Tracé de l'écart entre mesure et modèle de la densité de flux sortant

Sur la journée considérée, les écarts absolus sont faibles et sont de l'ordre de la précision des fluxmètres alors utilisés. En plus de cette relative imprécision, le nombre réduit de mesures, ainsi que l'incertitude observée sur certaines grandeurs d'entrée (coefficient d'absorption extérieur de la toiture par exemple), nous amène à ne pas poursuivre plus en avant les tentatives d'explication des écarts (biais, corrélation avec les variables météorologiques, ...).

## 5.4. Illustrations du logiciel :

### 5.4.1. Description du cas d'étude :

Le bâtiment considéré (figure 120) est de forme cubique, de 6 m de côté et en contact avec le sol. Nous considérons un découpage en trois zones : Un rez de chaussée de 36 m<sup>2</sup> et deux pièces au premier étage de 18 m<sup>2</sup> chacune :

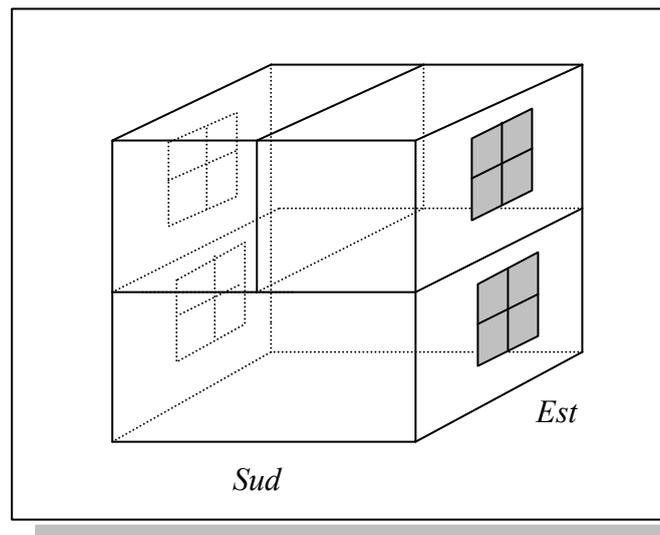


Fig. 120 : Croquis du bâtiment, face Sud

Les principales caractéristiques sont les suivantes : nous supposons que toutes les parois sont constituées de béton plein de 12 cm, le terre plein est constitué de 30 cm du même matériau. Sur les faces Est et Ouest, sont disposées des baies vitrées (vitrages simples) d'une surface élémentaire de 4 m<sup>2</sup> et de qualités optiques et conductives courantes.

Nous supposons en outre la présence d'un système de traitement d'air dans la zone Etage Ouest. En occultant pour cette étude les aspects liés à l'aéroulque, le bâtiment est donc constitué de 3 zones, 16 inter ambiances et 22 composants ( 17 parois, 4 vitrages et 1 système de climatisation). Le modèle conductif retenu pour les parois est un modèle à deux capacités (R2C). A ce moment, vis à vis de la résolution, ce cas nous conduit par exemple dans la zone Etage Ouest à un système thermique de dimension 15.

#### 5.4.2. Le choix du modèle du diffus :

Le modèle de reconstitution du rayonnement diffus sur une paroi quelconque fait partie des modèles rattachés à l'entité bâtiment. A ce jour deux modèles ont été intégrés et ce paragraphe illustre l'aspect multi-modèles de *CODYRUN* à travers la comparaison des résultats fournis par l'application successive des deux modèles.

En climat tropical humide, les mesures du rayonnement diffus de courte longueur d'onde montrent l'importance de ce type de sollicitations [Mezino 85]. Une analyse rapide sur le site de la Réunion témoigne d'un ensoleillement diffus important lorsque le direct est faible. Pour un concepteur, il est alors important de prévoir, en plus de celles vis à vis de l'ensoleillement direct, des protections liées à cette composante diffuse.

Au niveau de la répartition des sollicitations (directes et diffuses) pénétrant dans une zone (au travers des vitrages), le modèle considère que le rayonnement direct est incident sur le plancher et que le diffus intérieur se répartit uniformément. Au travers des caractéristiques optiques des matériaux de surface des parois considérées, il est nécessaire de résoudre un système linéaire pour obtenir les éclairagements absorbés par les noeuds de surface des parois.

Pour l'étude, nous avons extrait du fichier annuel une séquence de 2 journées consécutives extrêmes, l'une plutôt couverte (mais avec un diffus horizontal très important) et l'autre avec un ciel dégagé. Les courbes suivantes tracent l'évolution des rayonnements direct et diffus horizontaux pour la période de simulation.

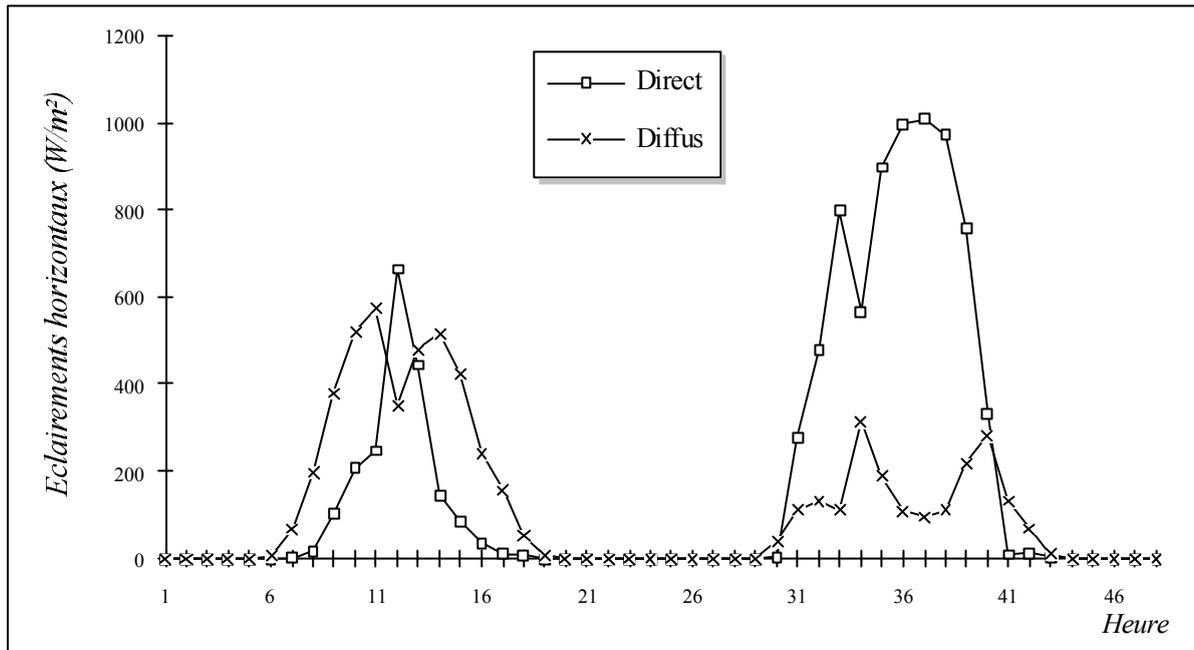


Fig. 121 : Etat d'enseiement horizontal

#### 5.4.2.1. Incidence du choix :

A travers le vitrage de la baie vitrée Est, une partie de l'énergie incidente est liée à la composante directe du rayonnement transmis et l'autre à sa fraction diffuse. Dans le but présent d'évaluer l'incidence des deux modèles, nous avons été amenés à ajouter au fichier résultat le rayonnement direct et diffus incident dans chacune de zones. Cet aspect est fort utile en thermique d'été, par exemple pour aider un concepteur dans le choix des solutions à mettre en oeuvre localement dans chaque zone pour parer à une surchauffe (choix de masques, de verres spéciaux, ...).

Pour la première journée, les courbes de la figure 122 représentent l'évolution du diffus incident dans la zone Etage Est, pour les cas diffus isotrope et diffus anisotrope (modèle de Willmott).

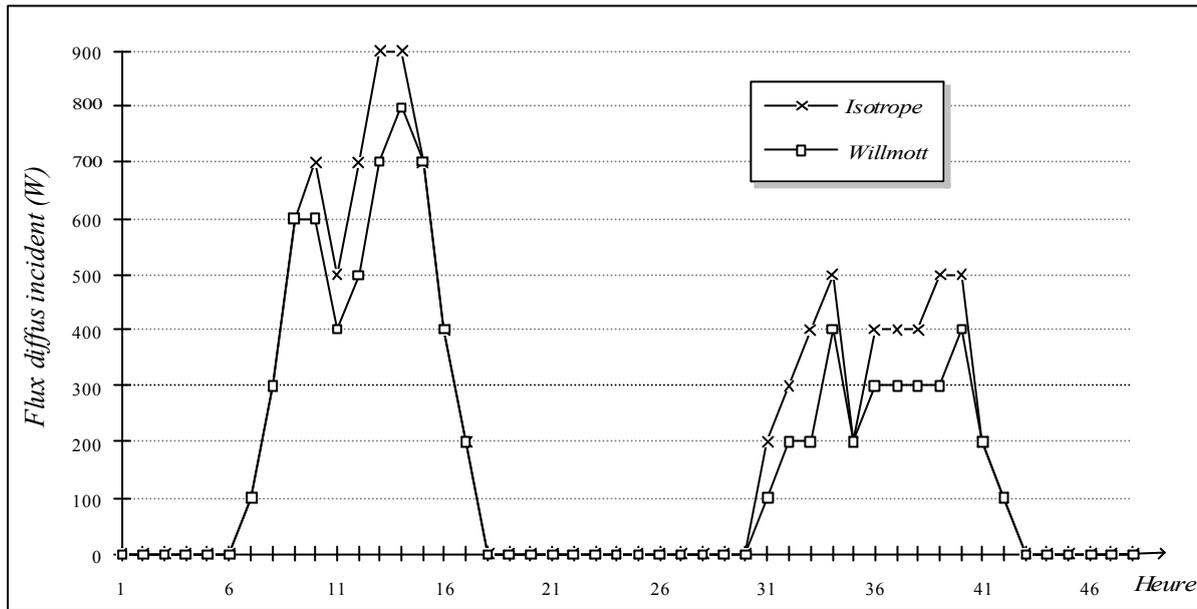


Fig. 122 : Diffus incident dans la zone Etage Est

Intégrer un modèle du diffus non isotrope revient à considérer comme non isotrope une partie du diffus calculé préliminairement à l'aide du modèle isotrope. En conséquence, le diffus incident dans une zone sera moindre avec le modèle non isotrope, en conformité avec la courbe précédente. Pour le direct incident, le tracé nous montrerait l'ordre inverse. La figure suivante permet de comparer les courbes d'évolution des températures intérieures de l'Etage Est, ce pour les deux cas précités.

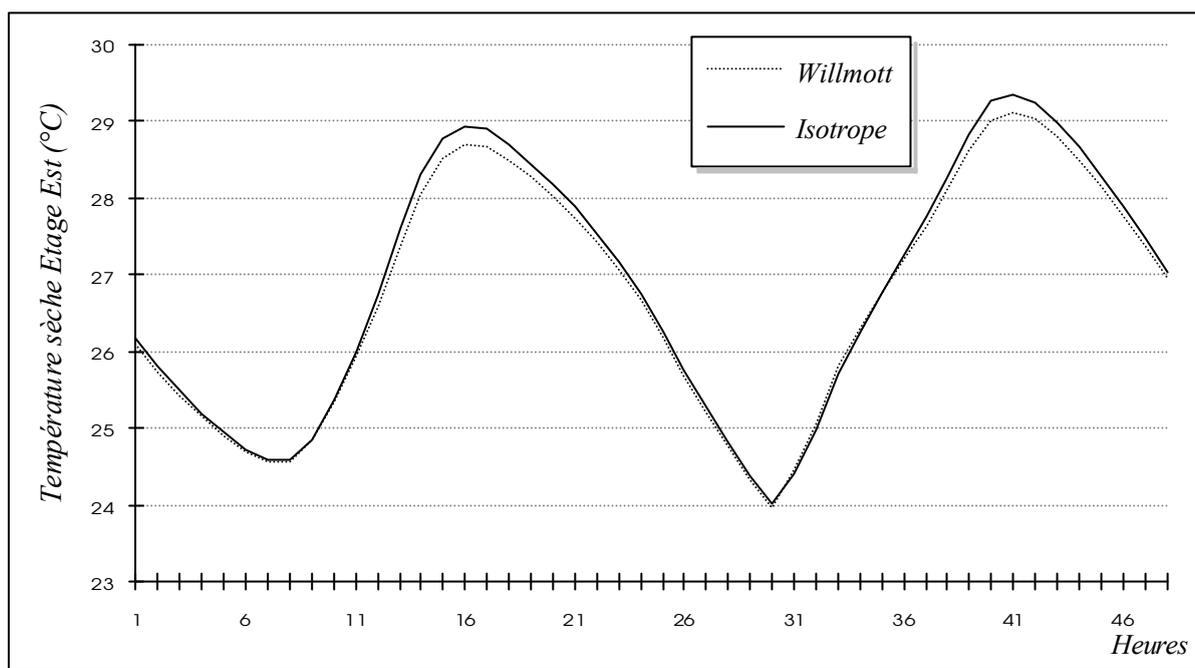


Fig. 123 : Evolution de la température sèche de la zone Etage Est

#### 5.4.2.2. Commentaires :

Pour notre bâtiment et la période considérée, les courbes d'évolution des températures intérieures (figure 123) sont pratiquement confondues. Cette simulation nous montre, dans notre cas particulier, que notre modèle global de bâtiment est peu sensible au modèle du rayonnement diffus. Une interprétation simple peut en être donnée. Dans le cas anisotrope, le rayonnement diffus provenant du modèle isotrope est partagé en deux parties, l'une isotrope, l'autre directive. Vis à vis du comportement énergétique d'un bâtiment, le couplage entre ces sollicitations extérieures et la zone concernée est réalisé au travers des vitrages. Pour les verres simples qui composent nos vitrages, les formules bibliographiques des coefficients de transmission du rayonnement direct et diffus ne sont que peu différents. D'autre part, l'expression du coefficient de transmission du rayonnement diffus ne fait pas intervenir l'angle d'incidence. En conséquence, la différence de répartition des apports selon le critère d'isotropie n'aura que peu d'incidence sur la réponse thermique de la zone.

Cette simulation appelle un commentaire supplémentaire sur les sollicitations choisies. La différence doit être faite entre l'importance relative du rayonnement diffus par rapport au direct et le caractère anisotrope du rayonnement diffus. Par temps dégagé, le rayonnement diffus possède une anisotropie importante autour du disque solaire de la bande horizon en fin de journée. Par temps nuageux, si la couverture est rétro-éclairée, le rayonnement diffus, s'il est plus important, présente un caractère plus

isotrope. Ainsi, vis à vis des deux journées de simulation choisies, la seule information de l'importance du diffus ne permet pas de présupposer de l'importance de l'anisotropie. En conclusion, il convient d'être prudent quant à la sensibilité au modèle de reconstitution du rayonnement diffus.

### 5.4.3. Application sélective de modèles : choix du modèle convectif intérieur :

La zone Etage Ouest étant climatisée, pour une meilleure compréhension des graphiques qui seront exposés lors des exploitations suivantes, nous présentons en préliminaire les paramètres liés à ce composant.

#### 5.4.3.1. Composant Système de traitement d'air :

La fenêtre de saisie et par conséquent les caractéristiques du composant Système de traitement d'air sont présentés sur la figure 124 :

The screenshot shows a software window titled "Consultation / Modification d'un composant". At the top, it displays "Libellé : Clim Ouest" and "Appartenant à : Zone Etage OUEST". The "Type" section on the left has several radio button options, with "Système de traitement d'air" selected. The main area is divided into "Sensible" and "Latent" sections. The "Sensible" section includes fields for "ON" (selected) and "OFF", "P. Froid" (10.0 kW), "T +" (26 °C), "T -" (26 °C), "P. Chaud" (10.0 kW), and "Cv" (100). The "Latent" section includes fields for "H +" (0 %), "H -" (0 %), "P. DesH" (0.0 kW), and "P. Hum" (0.0 kW). Both sections have a "Profil" dropdown menu set to "Aucun". At the bottom, there are navigation buttons: "<< Zone", "<< IA", "<<< Bâtiment", "<", and ">". "Valider" and "Annuler" buttons are also present.

Fig. 124 : Fenêtre de description d'un système de traitement d'air

Ainsi, pour un système de traitement d'air, des informations relatives aux apports sensibles et latents sont à connaître. Dans notre cas, nous ne considérons que la partie sensible. Pour cela, il faut aussi

définir les valeurs des températures de consigne (haute et basse), les profils horaires éventuels s'appliquant aux puissances, et les puissances disponibles (chauffage et refroidissement). Dans *CODYRUN*, pour permettre une meilleure intégration de systèmes tels que les planchers chauffants, il est possible de choisir pour la puissance mise en jeu les pourcentages convectifs et radiatifs. Dans le cas particulier du dimensionnement d'une installation, le programme considère que la puissance disponible est infinie.

#### 5.4.3.2. La convection intérieure :

Pour mémoire, le choix du modèle de la convection intérieure est effectué au niveau de la zone. Nous avons implanté trois modèles de la convection intérieure. Le premier est un modèle linéaire à coefficient d'échange convectif constant (mais modifiable par le concepteur), le second linéaire à coefficient dépendant du type de paroi (plancher, plafond, paroi verticale) et le dernier est un modèle non linéaire. Dans ce cas, le coefficient d'échange dépend de façon non linéaire de l'écart de température entre le fluide (l'air) et la surface considérée. L'intégration d'un tel modèle dans notre système nécessite un processus de résolution itératif avec un critère convergence modulable, par exemple sur la température d'air intérieure. Ce modèle non linéaire nécessite plusieurs résolutions de l'équation d'évolution d'état à chaque pas de temps. Avec un critère de convergence de  $10^{-3}$  °C sur la température d'air de la zone considérée, le nombre d'itérations est de 3 ou 4. L'utilisation de ce modèle tend donc à pénaliser fortement l'outil, vis à vis du temps de calcul, mais ce modèle peut être considéré comme le plus fiable.

Pour tester son implémentation, nous avons été amenés pour un cas donné à comparer des courbes d'évolution de températures sèches intérieures fournies par les modèles linéaire et non linéaire. Le choix du modèle convectif intérieur explique alors les écarts rencontrés. Pour tester la cohérence de l'implantation du modèle non linéaire, nous avons conduit deux simulations, l'une utilisant pour le coefficient d'échange convectif une valeur constante, égale à  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , et l'autre une expression non linéaire fonction de l'écart  $\Delta T$  des températures, soit  $(5 + \Delta T^{0.5}/100) \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Dans ces conditions, la pondération du terme exprimant la non linéarité rend la valeur de l'expression très peu différente de la valeur constante. Le tracé des courbes de température sèche intérieure montre alors que les courbes obtenues sont bien confondues.

#### 5.4.3.3. Exploitation :

Considérant les conditions de simulation du paragraphe précédent, nous nous intéressons maintenant à l'évolution de la température sèche intérieure de la zone Etage Ouest, ainsi qu'à la puissance sensible appelée. La zone étage Ouest est alors celle sur laquelle nous centrons notre intérêt. Dans le premier cas, cas A, la convection est intégrée à l'aide d'un modèle linéaire à coefficient constant ( $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), ce dans chacune des zones.

La puissance de l'installation est sensiblement inférieure à celle permettant de respecter la consigne de  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Avec une puissance de refroidissement d'1 kW, il en découle un décrochage de la température intérieure, pendant la seconde partie de la journée, période pendant laquelle le rayonnement solaire pénètre la zone Etage Ouest à travers le vitrage.

Dans le cas B, nous intégrerons la convection intérieure de manière non linéaire pour les trois zones. Cette simulation est cependant très coûteuse en temps calcul, en raison des itérations liées à ce modèle. Dans le dernier cas, C, illustrant l'application sélective des modèles, nous ne traiterons la convection de manière non linéaire que dans la zone qui nous intéresse plus particulièrement (l'étage Ouest) et nous utiliserons le modèle linéaire à coefficient constant pour les deux autres zones.

La superposition des courbes relatives aux trois cas fournit les résultats suivants :

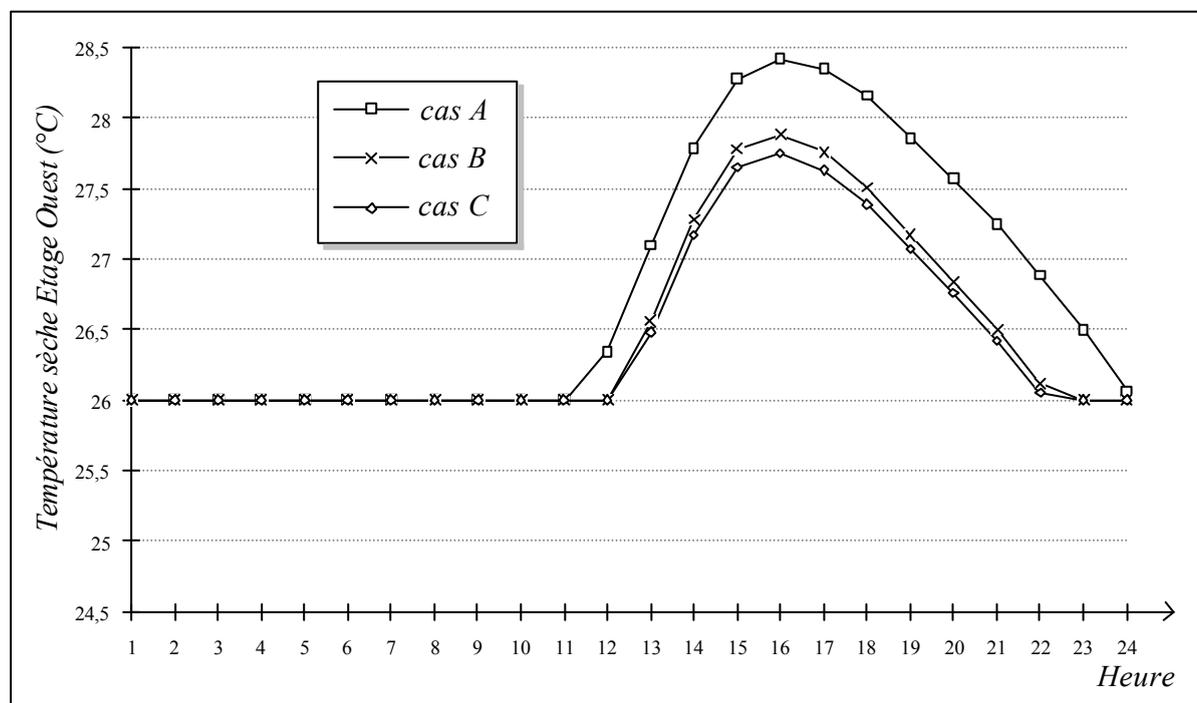


Fig. 125: Evolution de la température sèche de l'étage Ouest

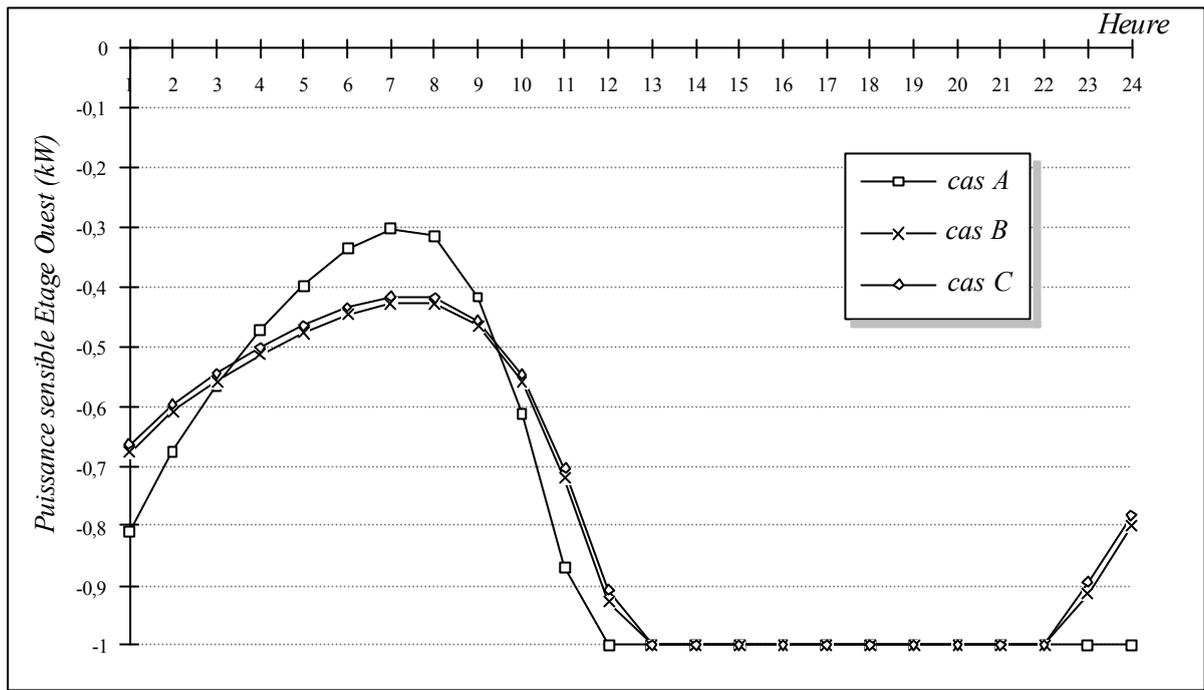


Fig. 126 : Evolution de la puissance de climatisation sensible de l'étage Ouest

En considérant comme exacte la solution proposée par le cas C, l'inadéquation du modèle à coefficient constant pour l'ensemble des zones du bâtiment est particulièrement claire. L'erreur sur la température atteint plus d'un degré et celle sur la puissance appelée est de l'ordre de 0.2 kW. Une explication de ces différences peut être celle de la valeur adoptée pour le coefficient d'échange ( $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ). Si l'examen des courbes de la figure 125 laisse penser qu'avec une valeur plus faible, l'erreur serait moindre, il faut savoir que la valeur choisie est celle le plus souvent rencontrée dans les codes simplifiés.

Par contre, le cas C montre la pertinence de l'application sélective du modèle non linéaire pour la convection, avec des courbes très proches du cas B, aussi bien en température qu'en puissance. En parallèle, la comparaison des temps de simulation (hors initialisation) pour une période d'une journée est donnée dans le tableau suivant :

Cas	Ecart de Température (°C)	Ecart en puissance (kW)	Durée de la simulation (mn*s)
A	1.0	0.2	0*54
B	0 (référence)	0 (référence)	2*53
C	0.1	0.01	1*35

Il existe ainsi approximativement un rapport de moitié entre les temps de simulation des cas C et B. Ce ratio peut être retrouvé par des considérations simples. En effet, il est possible en première approximation de supposer comme constant le temps nécessaire à la résolution de l'équation d'état d'une zone, soit  $t$  secondes. Si  $Nb\_zones$  est le nombre total de zones du bâtiment, dans le cas A, la résolution pour un pas de temps demande  $t_A = (Nb\_zones \cdot t)$  secondes. Supposons par ailleurs constant et égal à  $i$  le nombre d'itérations dans une zone, itérations introduites par le traitement de la convection intérieure. Dans le cas B, toutes les zones étant concernées par la non linéarité, le temps de calcul vaut simplement

$$t_B = (Nb\_zones \cdot i \cdot t) \text{ secondes.}$$

Dans le cas C, ce temps devient :

$$t_C = (i + (Nb\_zones - 1)) \cdot t \text{ secondes.}$$

Avec les valeurs correspondant à notre cas, ( $Nb\_zones=3$ ,  $i=3$ ), le rapport ( $t_C/t_B$ ) est bien proche de 0.5.

En raison de la faiblesse des couplages entre les systèmes formés par les zones, l'efficacité de l'application sélective des modèles était prévisible. Dans le cas présent, le couplage entre les zones n'est que conductif, couplage qui peut être qualifié de faible par rapport à un couplage aéraulique. Le niveau d'expertise d'un utilisateur thermicien de l'habitat peut ainsi être mis à profit, décidant du niveau de finesse des modèles à utiliser dans chacune des zones fonctions des couplages prévisibles. A terme, un système expert pourrait faire ce choix.

#### **5.4.4. Comparaison de modèles conductifs de parois :**

A l'aide du bâtiment de la figure 117 du paragraphe 5.3.4.2, nous allons illustrer l'intérêt du modèle anamorphose. Il s'agit de montrer que ce modèle permet, avec un nombre de noeuds réduit, d'obtenir une précision comparable à celle d'un modèle différences finies classiques (de la variable d'espace). Rappelons que le modèle anamorphose se traduit par un maillage de la paroi équidistant fonction de la résistance. La fenêtre de description suivante (figure 127) est celle permettant de

renseigner la constitution d'une paroi, au départ de la bibliothèque (cadre en haut au gauche) ou encore en renseignant les matériaux de chaque couche (cadre composition). Dans ce cas, les boîtes de listes des matériaux sont remplies avec les matériaux de la bibliothèque. Un élément de cette boîte de liste, *Nouveau*, permet de saisir un matériau ne figurant pas dans la bibliothèque.

**Constitution de la paroi**

Bibliothèque

Spécifique

Sens de description :  
de Pièce vers l'extérieur

Composition					
Couche	Matériau	Epaisseur	Lambda	Ro	C
1	Polypropylène <input type="button" value="↓"/>	0.006	0.27	940	1672
2	Contre Plaqué <input type="button" value="↓"/>	0.010	0.12	600	1500
3	Paille <input type="button" value="↓"/>	0.080	0.04	90	1100
4	<input type="button" value="↓"/>	0.000	0.00	0	0
5	<input type="button" value="↓"/>	0.000	0.00	0	0

Fig. 127 : Fenêtre de description des matériaux constitutifs

L'évolution du flux sortant obtenue au chapitre précédent, figure 118 du paragraphe 5.3.4.3, avec pour la toiture un modèle différences finies d'espace à 28 noeuds (10 par couche) sert de référence. Pour la même journée, les courbes de densités de flux sortant sont celles obtenues en utilisant pour la toiture un modèle conductif différent.

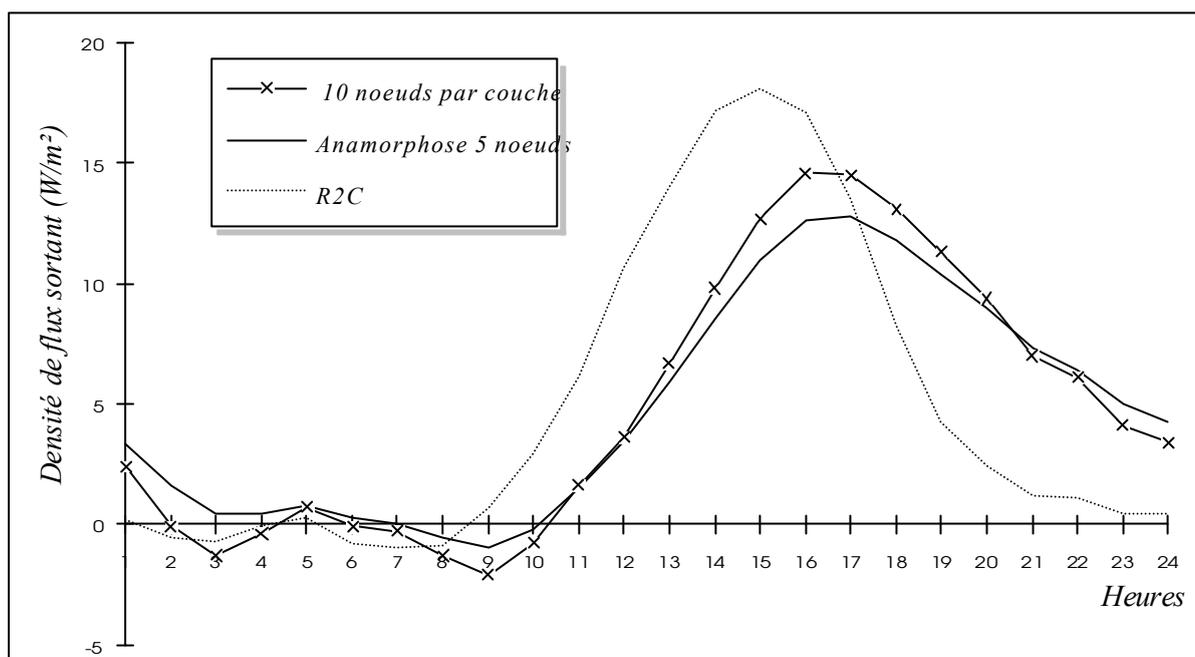


Fig. 128 : Evolution de la densité de flux sortant pour différents modèles conductifs

Sur la figure 128, la courbe utilisant pour la toiture considérée un modèle 2RC, confirme bien que, si ce modèle peut être utilisé pour évaluer les performances énergétiques globales d'un bâtiment, son utilisation est à proscrire dans le cas où des réponses en flux sont souhaitées. L'erreur tout à fait caractéristique est celle intervenant au niveau du déphasage. Vis à vis des modèles aux différences finies couche par couche, dès lors que le nombre de noeuds dans chacune des couches excède 3, la courbe de réponse en flux est pratiquement confondue avec celle de référence. La tendance est la même pour le modèle anamorphose, avec cependant un nombre de noeuds réduit pour atteindre la même précision.

#### 5.4.4.1. Analyse comparative de modèles :

Pour mettre en évidence les différences entre ces modèles, plusieurs simulations ont été effectuées. Nous définirons l'erreur d'un modèle comme la série constituée de la différence à chaque pas de temps des résultats de ce modèle et de la valeur issue du modèle de référence. Un premier tracé non reproduit est celui de l'écart moyen, c'est à dire de la moyenne de l'erreur. Un biais est constaté au niveau du modèle 3R2C (-0.51 W/m²), alors que l'erreur est sensiblement centrée sur zéro pour les autres modèles. Nous donnerons plus en avant une explication de ce biais. Par ailleurs, pour un même nombre de noeuds, il est à noter que les modèles anamorphoses et différences finies couche

par couche ont des biais (très faibles), de même signe et du même ordre de grandeur. Pour affiner la comparaison, nous avons tracé à la figure 129 l'écart absolu moyen de l'erreur, fonction du nombre de noeuds de discrétisation.

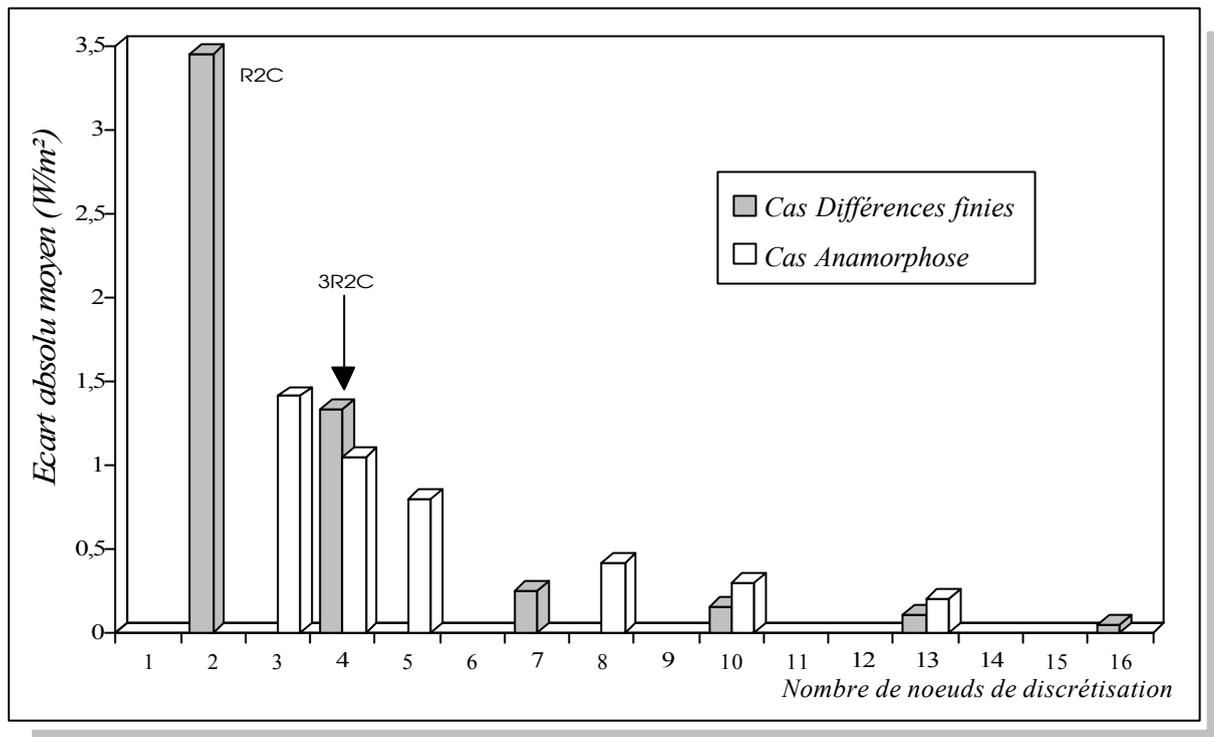


Fig. 129 : Evolution de l'écart absolu moyen de l'erreur avec le nombre de noeuds

Il est prévisible, dans chacun des deux cas, modèle différences finies classique ou anamorphose, que l'écart absolu diminue lorsque le nombre de noeuds augmente. Le modèle différences finies couche par couche, s'il est précis, est limité numériquement par le nombre de noeuds nécessaire à sa mise en oeuvre. La description de la paroi conditionne alors le modèle. En effet, pour une couche, le modèle le plus simple comporte 3 noeuds et est du type 2RC. Compte tenu des noeuds d'interface entre les couches jointives, pour une paroi comportant  $n_c$  couches, le nombre de noeuds minimal est alors de  $n_c + 2(n_c - 1) = 3n_c - 2$ . Dans le cas de notre toiture, le modèle couche par couche le plus dépouillé comporte déjà 7 noeuds. En deçà de cette limite, les seuls modèles utilisables sont ceux du type différences finies procédant à une globalisation des couches, tels que le 2RC ou 3R2C. Le cas du 2RC ayant été précédemment abordé, nous avons signalé au chapitre II que le modèle 3R2C posait le problème de la répartition dans la paroi des deux noeuds intérieurs. Cette répartition étant le plus souvent faite au quart et trois quarts de l'épaisseur totale de la paroi, la pertinence de ce choix

dépend en fait de la paroi en cours de maillage. Appliquée à notre toiture, cette répartition conduit à un biais de  $-0.51 \text{ W/m}^2$ .

A la différence du modèle couche par couche et comme son étymologie l'indique, le nombre de noeuds est indépendant en particulier de la paroi considérée et constitue un paramètre du modèle anamorphose. La répartition des noeuds est alors faite sans caractère arbitraire. Le tracé de l'écart type de l'erreur, constituant la figure 130, permet de mieux analyser la dispersion des résultats fournis par les modèles :

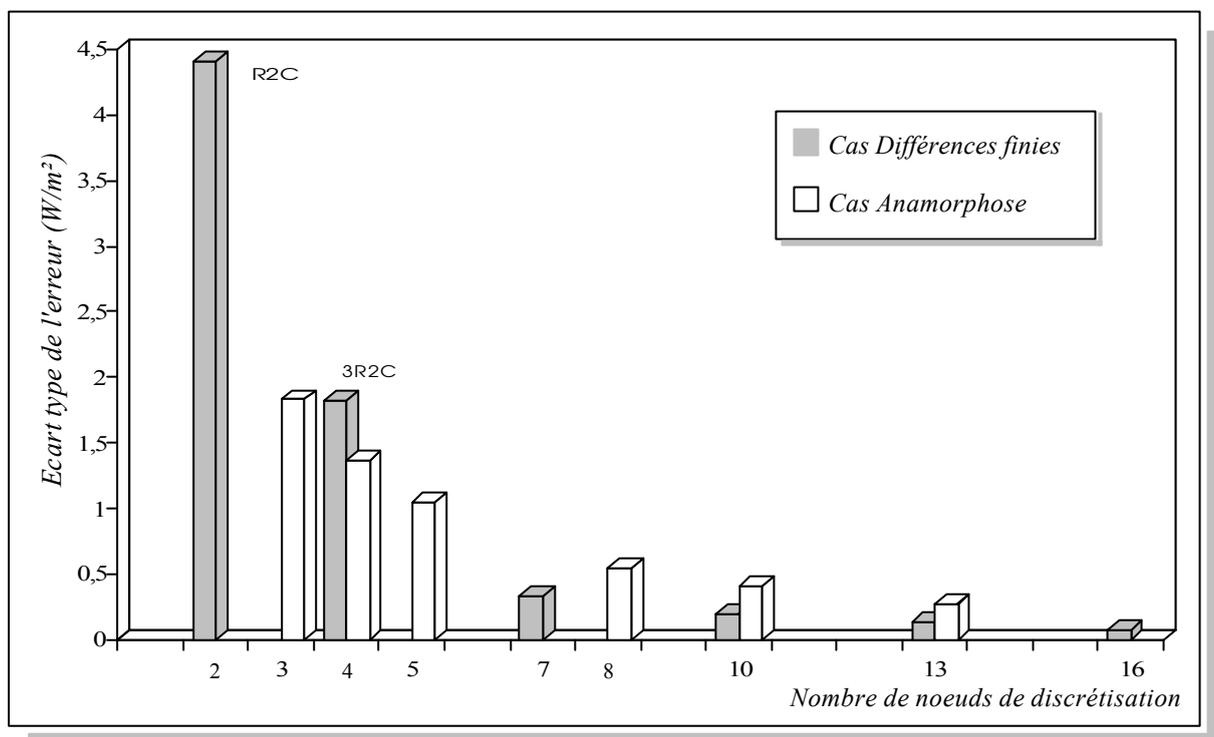


Fig. 130 : Evolution de l'écart type de l'erreur avec le nombre de noeuds

Compte tenu des remarques précédentes, pour le cas considéré et la journée de sollicitations choisie, le modèle anamorphose à 3 noeuds est préférable au 3R2C, bien que comportant un noeud de discrétisation de moins. Les résultats obtenus auraient pu être encore plus significatifs avec une paroi comportant des couches de résistances thermiques plus inhomogènes.

#### 5.4.4.2. Intérêt de l'optimisation du maillage :

L'optimisation du nombre de noeuds du modèle conductif de paroi est surtout liée à des considérations numériques, visant un compromis entre temps de calcul raisonnable et précision générée. En utilisant un modèle à deux noeuds dans les parois autres que la toiture (au nombre de 6), le tableau suivant donne l'évolution relative du temps de calcul nécessaire pour une journée de simulation, fonction du nombre de noeuds disposés dans le toit.

<i>Nombre de noeuds dans la toiture</i>	<i>Durée relative</i>
2	100%
5	125%
10	187%
28	337%

Sur la machine considérée, un autre type de tableau peut être dressé, donnant le temps de calcul en fonction du nombre total de noeuds. Pour notre cas, il convient de rajouter au nombre de noeuds précédents 12 noeuds de paroi, les noeuds de température sèche et radiante moyenne.

<i>Nombre total de noeuds</i>	<i>Durée de la simulation</i>
16	8 s
19	10 s
24	15 s
42	27 s

En ajoutant un point supplémentaire au tableau précédent, la courbe suivante peut être tracée.

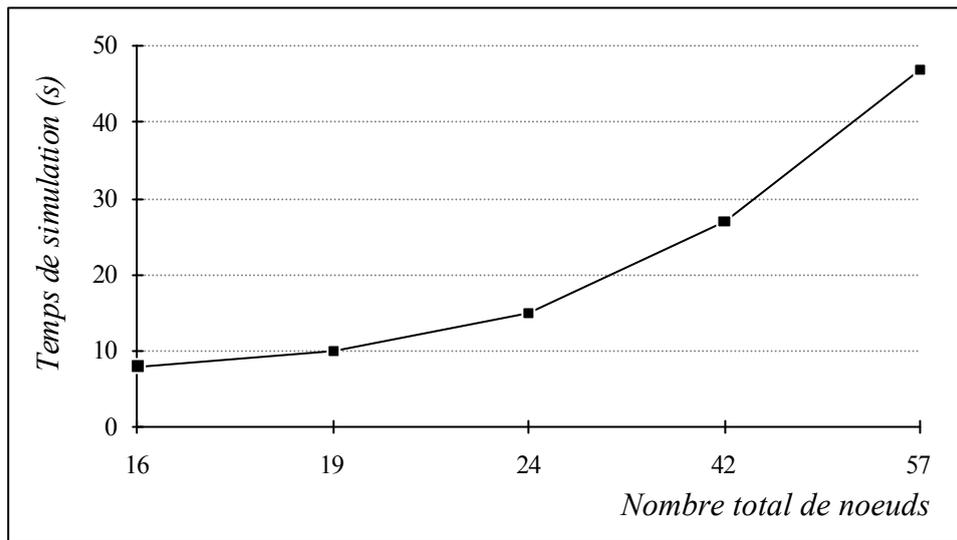


Fig. 131 : Evolution du temps de calcul fonction du nombre de noeuds

La forme de la courbe de la figure 131 est d'une façon générale quadratique ou cubique, l'exposant dépendant principalement de la méthode employée pour résoudre le système linéaire formé par le système thermique. Le nombre d'opérations nécessaire à chacune des méthodes est détaillé dans [Herrlin 92] et certains points particuliers évoqués dans [Walton 84].

En interpolant par exemple entre les points précédents, il est possible de calculer le temps prévisionnel lié à la résolution des systèmes thermiques sur la période de simulation donnée. En construisant des outils du même type pour les systèmes aérauliques et hydriques, l'intérêt est alors de proposer à l'utilisateur un temps de calcul prévisionnel, avant le démarrage de la simulation. Cette anticipation peut être intéressante en raison des caractères multizone et multi-modèle de *CODYRUN*, qui peuvent fortement pénaliser l'outil au niveau du temps calcul.

Pour terminer sur cet aspect, un système de décision multi-critère, ou mieux encore un système expert, pourrait prendre en compte ce temps prévisionnel, en plus de l'objectif de la simulation et du bâtiment lui-même, pour intervenir sur les modèles enclenchés, et en particulier au niveau du maillage conductif des parois.

## 5.5. Conclusion :

Compte tenu du champ balayé par l'outil, nous avons souligné que la validation du code demande à être complétée. Cependant, il ne nous est pas paru intéressant de rapporter la totalité des tests que

nous avons réalisés. Les exemples présentés dans ce chapitre n'apportent qu'un éclairage partiel sur les possibilités de *CODYRUN*. Ainsi, vis à vis de l'interface, l'ensemble des fenêtres de l'application n'est pas présenté, en raison de la place qu'il aurait fallu accorder à l'ensemble des copies d'écran. Une autre démarche aurait été de traiter tout au long de ce chapitre un seul cas, en mettant en avant chacun des aspects. Nous avons préféré illustrer quelques cas isolés permettant mener de concert la validation.

# Bibliographie



- [Abdesselam 85] **Abdesselam, M.** *Complément à Casamo-Clim. Malette pédagogique du logiciel.* Paris : Ecole des Mines, Centre d'Energétique, 1985. 162 p.
- [Achard 80] **Achard, G., Brau, J., Allard, F.** *Ponts thermiques dans les bâtiments en régime variable.* Revue Générale de Thermique, 1980, n° 218.  
p. 105-122
- [Ahmad 93] **Ahmad, Q.T., Szokolay, S.V.** *Thermal design tools in Australia, a comparative study of TEMPER, CHEETAH, ARCHIPAK and QUICK.* Proceedings of Building Simulation 93, Adelaide, IBPSA, 1993.  
p. 351-357.
- [Allard 86] **Allard, F., Inard, C., Roldan, A.** *Etude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde dans une cellule d'habitation.* Annales de l' I.T.B.T.P. 1986, n°442. 60 p.
- [Allard 87] **Allard, F.** *Contribution à l'étude des transferts de chaleur dans les cavités thermiquement entraînées à grand nombre de Rayleigh. Application aux cellules d'habitation.* Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1987. 335 p.
- [Allard 89] **Allard, F., Herrlin, M.** *Wind-Induced Ventilation.* ASHRAE Transactions, 1989, Vol. 95, Part. 2. p. 722-728.
- [Allard 92] **Allard, F., Utsumi, Y.** *Airflow through large openings.* Energy and Buildings, 1992, n°18. p.133-145.

- [Auffret 84] **Auffret, P-Y., Gatina, J-C., Hervé, P.** *Habitat et climat à la Réunion. Construire en pays tropical humide, Documents et Recherches n°11.* Saint-Denis de la Réunion : Fondation pour la recherche et le développement dans l'Océan Indien, 1984. 160 p.
- [Augenbroe 91] **Augenbroe, G., Winkelman, F.** *Integration of simulation into the building design process.* Proceedings of Building Simulation '91, IBPSA, Nice, 1991. p. 367-374.
- [Aynsley 88] **Aynsley, R. M.** *A resistance approach to estimating airflow through buildings with large openings due to wind.* ASHRAE Transactions, 1988, Vol. 94. p. 1661-1669.
- [Axley 89] **Axley, J.** *The coupled airflow and thermal analysis problem in building airflow simulation simulation.* ASHRAE Transactions, 1989, Vol. 95, Part. 2. p. 621-628.
- [Babbage 86] **Babbage, P.** *Oasis : un logiciel de simulation thermique.* Bâtiment - Energie, 1986 (Avril - Juin), n°44. p. 75-77.
- [Bacot 85] **Bacot, P., Bonfils, R., Neveu, A., Ribuot, J.** *Modélisation des systèmes thermiques complexes par la méthode de couplage.* Revue Générale de Thermique, 1985, n°280. p.381-386.
- [Baronnet 85] **Baronnet, F.** *Etude thermique de l'habitat individuel à la Réunion.* Thèse : Sci. : Université de Paris VII, 1987. 182 p.
- [Barrere 89] **Barrere, M.** *La thermique aujourd'hui.* Revue Générale de Thermique, 1989, n°327. p.145-153.

- [Bernard 84] **Bernard, R., Menguy, G., Schwartz M.** *Le rayonnement solaire Conversion thermique et applications.* Paris : Technique et Documentation, 1980. 253 p.
- [Berges 86] **Berges, B.** *Analyse du comportement conductif de l'enveloppe d'un bâtiment : recherche de modèles de transfert pour un flux monodimensionnel au travers des parois opaques.* Thèse : Sci. : Université de Nice. 1986. 296 p.
- [Bertalanffy 68] **Bertalanffy, L. von** *General System Theory, foundation, development, applications.* New York : G. Braziller, 1968 trad. Française : *Théorie Générale des Systèmes.* Paris Dunod, 1973. 296 p
- [Blanc Sommereux 91] **Blanc Sommereux, I.** *Etude du couplage dynamique de composants du bâtiment par synthèse modale.* Thèse : Sci. : Ecole des Mines de Paris, 1991. 210 p.
- [Bloomfield 89] **Bloomfield, D. P.** *Evaluation procedures for building thermal simulation programs.* Watford (U.K.): Building Research Establishment, 1989. p. 217-222.
- [Bonneau 93] **Bonneau, D., Rongere, F.X., Covalet, D., Gautier, B.** *CLIM 2000 : modular software for energy simulation in buildings.* Proceedings of Building Simulation '93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 85-91.
- [Boyer 93] **Boyer, H., Brau, J., Gatina, J.C.** *Multiple model software for airflow and thermal building simulation. A case study under tropical humid climate, in Réunion Island.* Proceedings of Building Simulation '93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 111-117.

- [Brasselet 91] **Brasselet, J.P., Domblides, J.P., Marchio, D.** *Banc d'essai comparatif de logiciels de calculs de charges hygrothermiques*. Chauffage Ventilation Conditionnement, Mars 1992, N° 3. p. 27-31.
- [Brasselet 93] **Brasselet, J.P.** *Le logiciel TAS (Thermal Analysis Software)*. Séminaire Architecture bioclimatique, Sophia-Antipolis, Valbonne, ADEME 1993. 2 p.
- [Brau 80] **Brau, J.** *Modélisation thermique des bâtiments. Validation des modèles de calcul par une étude expérimentale en ambiance climatique simulée*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1980. 295 p.
- [Brau 85] **Brau, J.** *Polycopié de cours : Théorie du conditionnement d'air*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire Equipement de l'Habitat, 1985. 81 p.
- [Brau 87] **Brau, J., Roux, J.J., Depecker, P., Croizier, J., Gaignou, A., Finas, R.** *Micro-informatique et comportement thermique des bâtiments en régime dynamique : CODYBA*. Génie Climatique, 1987, n°11. p. 15-23.
- [Brau 92] **Brau, J., Roux, J.J., Krauss G.** *Cahier des algorithmes du logiciel CODYBA*. Paris : AFME, 1992. p. 59.
- [Brejon 88] **Brejon, P.** *Les logiciels d'énergétique des bâtiments. Développement, évaluation technique, illustrations*. Thèse : Sci. : Ecole des Mines de Paris, 1988. 161 p.

- [Brown 62] **Brown, W.G.** *Natural convection through rectangular openings in partitions -2 : Horizontal partitions*, Int. J. Heat and Mass Transfer, 1962, Vol. 5. p. 869-881.
- [Cabirol 84] **Cabirol, T.** *Habitat bioclimatique : l'incidence du soleil et du vent*. Afrique Expansion, 1984, n° 6. p. 45-48.
- [Caccavelli 88 a] **Caccavelli, D., Roux, J.J., Brau, J.** *Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment multizone : prise en compte des phénomènes de ventilation*. Revue Générale de Thermique, 1987, n°311. p. 585-596.
- [Caccavelli 88 b] **Caccavelli, D.** *Modélisation du comportement thermique des bâtiments multizones : adaptation à un processus de conception*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988. 477 p.
- [Cadiergues 77] **Cadiergues, R.** *Méthodes d'étude de la ventilation naturelle*. Promoclim E, Etudes Thermiques et Aérauliques, 1977, Tome 8E n°5. p. 307-318.
- [Cadiergues 78] **Cadiergues, R.** *Un mode simple de calcul des flux à travers les vitrages*. Promoclim E, tome 9E n°1, 1978. p. 3-20.
- [Campana 85] **Campana, D., Neirac, F., Watremez, G.** *Elaboration d'un logiciel CASAMO-TROPICAL sur micro-ordinateur pour l'aide à la conception thermique des bâtiments en climat tropical. Application au Sénégal*. Paris : Ecole des Mines, Centre d'Energétique, 1985. 160 p.
- [Chabriat 93] **Chabriat, J-P.** *Analyse énergétique de procédés de fabrication en sucrerie de cannes*. Thèse : Sci. : Université Claude Bernard, Lyon I, 1993. 174 p.

- [Clain 69] **Clain, F.** *Calcul de l'ensoleillement et apports par les vitrages*. Industries thermiques et aérauliques, Nov. 1969, n° 698. p. 577-587
- [Clarke 85] **Clarke, J., A.** *Energy simulation in building design*. Glasgow (U.K.) : Adam Hilger Ltd, 1985. 383 p. ISBN 0-85274-797-7
- [C.S.T.B. 90] **C.S.T.B.** Règles Th-K77. Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction. Mise à jour 1990. 154 p.
- [C.S.T.B. 91] **C.S.T.B.** Règles Th-G. Règles de calcul du coefficient GV des bâtiments d'habitation et du coefficient G1 des bâtiments autres que d'habitation. Mise à jour 1991. 88 p.
- [Depecker 82] **Depecker, P., Brau, J., Rousseau, S.** *Pertinence des modèles simplifiés pour la description du comportement des bâtiments en régime thermique variable*. Annales de l' I.T.B.T.P., 1982, n°404. p. 138-150.
- [Dreyfus 60] **Dreyfus, J.** *Le confort dans l'habitat en pays tropical*. Paris : Eyrolles, 1960. 350 p.
- [Drogemuller 93] **Drogemuller, R., Suehrcke, H.** *Intelligent CAD as an interface to thermal simulation programs*. Proceedings of Building Simulation 93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 55-61.
- [El Diasty 93] **El Diasty, R., Fazio, P., Budaiwi, I.** *The dynamic modelling of air humidity behaviour in a multi-zone space*. Building and Environment, 1993, Vol. 28, n°1. p. 33-51.

- [Fauconnier 80] **Fauconnier, R.** *Stabilité et précision des schémas aux différences finies. Application à la résolution de l'équation de chaleur avec conditions aux limites asymétriques.* Annales de l' I.T.B.T.P., 1980, n°381. p. 107-127.
- [Fauconnier 81] **Fauconnier, R., Grelat, A.** *Thermique de l'habitat : bases de la modélisation thermique.* Annales de l' I.T.B.T.P., 1981, n°395. p. 123-138.
- [Fauconnier 87] **Fauconnier, R.,Guillemard, P., Grelat, A.** *Algorithmes BILGO et BILGA.* Annales de l' I.T.B.T.P., 1987, n°456 à 458. p. 85-116. ISSN 0020-2568.
- [Feustel 89] **Feustel, H., E.** *The COMIS Infiltration Model.* Proceedings du séminaire Building Simulation'89, Vancouver, 1989. p. 265-270.
- [Feustel 92] **Feustel, H., E., Dieris, J.** *A survey of airflow models for multizone structures.* Energy and Buildings, 1992 , n°18. p. 79-100.
- [Gatina 82] **Gatina, J.C., Hervé, P., Leveau, J.** *Habitat et climat à la Réunion.* Séminaire du mois de juin 1982, Saint-Denis de la Réunion, 1982. 84 p.
- [Gery 90] **Gery A.** *Cours photocopié de Transferts de chaleur.* Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire Equipement de l'Habitat, 1990. 185 p.
- [Gille 84] **Gille, J.C., Clique, J.M.** *Systèmes linéaires et équations d'état.* Paris : Eyrolles, 1984. 186p.

- [Gilles 86] **Gilles R.** *Mise au point de fichiers météorologiques pour les départements d'Outre-Mer et certains pays d'Afrique.* Cahiers scientifiques et techniques de la C.O.F.E.D.E.S., 1986. p. 51-67.
- [Gilles 88] **Gilles, R.** *Habitats climatiques. Cahier d'algorithmes.* Paris : Ministère du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, 1988, 316 p. Contrat Plan Construction N° 84 61 185 00 223 7501. ISBN 2-11-085-355-7
- [Gosse 78] **Gosse, J.** *Sur la conduction thermique variable dans un mur composite à propriétés constantes.* C.R. Acad. Sc., 1978, T. 286. p. 303-306.
- [Gosse 84] **Gosse, J.** *Sur une méthode analytique de résolution de la conduction thermique dans les murs composites.* Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, Vol. 27, n°9. p. 1533-1538.
- [Greff 89] **Greff, J.-M.** *La nouvelle réglementation thermique française pour l'habitat.* Revue Générale de Thermique, 1989, n°335-336. p. 632-635.
- [Gschwind 89] **Gschwind, M., Hutter, E., Morand, P., Neirac, F.-P., Vinot, B.** *Automatique et gestion énergétique. Acquis et perspectives suite aux travaux du G.E.R. IRCOSE.* Revue Générale de Thermique, 1989, n°335-336. p. 691-699.
- [Heller 91] **Heller, M.** *Faire son marché pour le développement Windows.* Micro-systèmes, Décembre 1991, n° 125. p. 128-130.
- [Herrlin 92] **Herrlin, M., K., Allard, F.** *Solution methods for the air balance in multizone buildings.* Energy and Buildings, 1992, n°18. p. 159-170.

- [Ineichen 87] **Ineichen, P., Perez, R., Seals, R.** *The importance of correct albedo determination for adequately modeling energy received by tilted surfaces.* Solar Energy, 1987, Vol. 39, n°4. p. 301-305.
- [Ineichen 88 a] **Ineichen, P., Zelenka, A., Guisan, O., Razafindraibe, A.** *Solar radiation transposition models applied to a plane tracking the sun.* Solar Energy, 1988, Vol. 41, n°4. p. 371-377.
- [Ineichen 88 b] **Ineichen, P., Zelenka, A., Guisan, O., Razafindraibe, A.** *Transposition horaire du rayonnement diffus. Application de 4 modèles pour 4 sites suisses.* Université de Genève : Série de publications du CUEPE n°32, 1988, publication n°16. 118 p.
- [Jeandel 93] **Jeandel, A., Favret, F., Lapenu, L.** *ALLAN. Simulation. A general software tool for model description and simulation.* Proceedings of Building Simulation '93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 291-298.
- [Judkoff 88] **Judkoff, R. et al.** *Validation of building energy analysis simulation programs at the Solar Energy Research Institute.* Energy and Buildings, 1988, n°10. p. 221-239.
- [Kernighan 89] **Kernighan, B.W., Ritchie, D.M.** *Le langage C.* Paris : Masson, 1989. 215 p.
- [Khodr 90] **Khodr-Mneimne, H.** *Transferts thermo-aérauliques entre pièces à travers les grandes ouvertures.* Thèse : Sci. : Université de Nice, 1990. 120 p.

- [Kohonen 89] **Kohonen, R.** *Modeling and calculating moisture transfer in building materials*. Proceedings of the XXI Symposium of the International Center for Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, 1989. p. 3-20.
- [Krauss 89] **Krauss, G.** *Cours polycopié : Aéraulique et bilan thermique*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire Equipement de l'Habitat, 1989. 53 p.
- [Laret 89] **Laret, L.** *Le concept de modèle adapté*. Actes du séminaire Outils d'aide à la conception et à la gestion, Sophia-Antipolis, AFME, 1989. 11 p.
- [Lebru 83] **Lebru, A.** *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, n°239, Cahier 1847. 39 p.
- [Le Moigne 90] **Le Moigne, J.L.** *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod, Collection Afcet Systèmes, 1990. 178 p.
- [Lefebvre 89] **Lefebvre, G.** *Modèle analytique simplifié d'intermittence*. Revue Générale de Thermique, 1989, n°335-336. p. 670-682.
- [Marenne 85] **Marenne, C., Fragnaud, F., Klammer, J., Groleau, D.** *Modélisation de la ventilation naturelle à l'intérieur des locaux en climat tropical : couplage thermique-ventilation*. France : CERMA, 1985, 53 p. Rapport n° 5.04.1010.
- [Melchor 82] **Melchor, C., V.** *New formulae for the equivalent night sky emissivity*. Solar Energy, 1982, Vol. 28, n°6. p. 489-498.

- [Melo 89] **Melo, C., Hammond, G.P.** *Modeling and assessing the Sensitivity of External Convection from Buildings Facades*. Proceedings of the XXI Symposium of the International Centre for Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, 1989. p. 683-695.
- [Microsoft 91] **Microsoft** *Microsoft C for Windows Graphical Environment*. Seattle : Microsoft Corporation, 1991. 960p.
- [Mokhtari 88] **Mokhtari, A. M.** *Etude du comportement thermique des bâtiments en contact avec le sol par l'analyse modale*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988. 227 p.
- [Molle 84] **Molle, N.** *Etude théorique et expérimentale du comportement thermique de l'habitat en milieu tropical humide*. Thèse de Doct. Ing. : Ecole Centrale de Paris, 1984. 268 p.
- [Moller 93] **Moller, S.K., Guthrie, K.I.** *Energy and comfort optimisation for the homebuilder*. Proceedings of Building Simulation '93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 71-75.
- [Passard 90] **Passard, J., Peube, J.-L.** *Modélisation des phénomènes aérauliques dans l'habitat et méthode de réduction*. Revue de Physique Appliquée, 1990, n°25. p. 81-98.
- [Pelletret 89 a] **Pelletret, R., Soubra, S.** *Le projet IISIBât : Interfaces Intelligents pour la Simulation dans le Bâtiment*. Actes du séminaire Outils d'aide à la conception et à la gestion, Sophia-Antipolis, AFME, 1989. 17 p.
- [Pelletret 89 b] **Pelletret, R., Khodr, H.** *Transferts d'air entre pièces*. Revue Générale de Thermique, 1989, n°335-336. p. 657-662.

- [Peneau 89] **Peneau, J.P.**, *Simula, logiciel de simulation thermique multi-zones en régime variable*. Actes du séminaire Outils d'aide à la conception et à la gestion, Sophia-Antipolis, AFME, 1989. 7 p.
- [Perez 87] **Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D.** *A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces*. Solar Energy, 1987, Vol. 39, n°3. p. 221-231.
- [Perez Sanchez 89] **Perez Sanchez, M.** *Typologie et uniformisation syntaxique des modèles de transfert de chaleur dans le contexte de la thermique du bâtiment*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1989. 356 p.
- [Petzold 91] **Petzold, C.** *Programmer sous Windows (version 3.0)*. Paris : Dunod, 1991. 1039 p.
- [Peuportier 89] **Peuportier, B.** *Analyse énergétique et structuration en objets : l'outil de recherche COMFIE*. Actes du séminaire Outils d'aide à la conception et à la gestion, Sophia-Antipolis, AFME, 1989. 10 p.
- [Pouget 89] **Pouget, A.** *Les réglementations françaises pour l'habitat et le secteur non résidentiel neufs*. Energétique des Bâtiments. T. 3, les bâtiments et leurs équipements. Paris : PYC Edition, 1989. p.453-485.
- [Press 88] **Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T.** *Numerical Recipes in C. The art of scientific computing*. Cambridge (U.K.) : Cambridge University Press, 1988. 735 p. ISBN 0-521-354-X

- [Raoust 88] **Raoust, M.** *Simulation et aide à la conception*. Energétique des Bâtiments. T. 2, calcul des enveloppes. Paris : PYC Edition, 1988. p. 161-185.
- [Robert 80] **Robert, E.** *Effects of overhang shading of windows having arbitrary azimuth*. Solar Energy, 1980, Vol. 24. p. 305-312.
- [Robin 91 a] **Robin, C.** *Intégration de savoir expert et d'outils de simulation pour la conception thermique des bâtiments et des systèmes*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1991. 313 p.
- [Robin 91 b] **Robin, C., Brau, J., Depecker, P.** *SETIS : an intelligent system for thermal design of buildings*. Proceedings of Architecture and Urban Space, Séville, 1991. p. 451-456.
- [Roldan 85 a] **Roldan, A.** *Etude thermique et aéraulique des enveloppes de bâtiment. Influence des couplages intérieurs et du multizonage*. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1985. 310 p.
- [Roldan 85 b] **Roldan, A., Achard, G., Roux, J.J.** *Etude critique de quelques hypothèses relatives aux simulations du comportement thermique des bâtiments*. Revue Générale de Thermique, 1985, n°287. p.789-797.
- [Rongère 89] **Rongère, F-X., Bonneau, D., Covallet, D., Gautier, B.** *CLIM 2000 : un logiciel modulaire pour l'élaboration de modèles thermiques pour l'habitat*. Revue Générale de Thermique, 1989, n°335-336. p. 644-649.
- [Rosnay 75] **Rosnay, J. de** *Le macroscope*. Paris : Seuil, 1975. 346 p.

- [Roux 84] **Roux, J.J.** *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments.* Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1984. 201 p.
- [Rumianowski 89] **Rumianowski, P., Brau, J., Roux, J.J.** *An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system.* Proceedings of ASHRAE Conference On Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, Orlando (Florida), 1989. p. 224-233.
- [Sacadura 93] **Sacadura, J.F.** *Initiation aux transferts thermiques.* Paris :Technique et Documentation, 1993. 439 p.
- [Saulnier 85] **Saulnier, J.-B., Alexandre, A.** *La modélisation thermique par la méthode nodale : ses principes, ses succès et ses limites.* Revue Générale de Thermique, 1985, n°280. p.363-372.
- [Schneider 91] **Schneider, P.** *Etude comparative entre les méthodes de connexion et de couplage appliquées à la simulation du comportement thermique des bâtiments multi-zones.* Rapport de D.E.A., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1991. 53 p.
- [Takao 93] **Takao, T., Kazumi, S.** *Computer simulation of multiroom temperature and humidity variation under variable infiltration conditions.* Proceedings of Building Simulation 93, Adelaide, IBPSA, 1993. p. 401-406.
- [Tourrand 91] **Tourrand, C.** *Caractérisation thermique de parois complexes utilisées dans l'habitat.* Thèse : Sci. : Université de Paris VII, 1991. 265 p.

- [Tourrand 93 a] **Tourrand, C., Boyer, H., Brau, J., Gatina, J.C.** *Analyse comparative de résultats expérimentaux et simulés de paramètres caractéristiques de toitures complexes : une application du logiciel de simulation thermo aéraulique des bâtiments, CODYRUN.* Séminaire Architecture bioclimatique, Sophia-Antipolis, Valbonne, ADEME 1993. 11 p.
- [Tourrand 93 b] **Tourrand, C.** *Caractérisation thermique de parois complexes utilisées dans l'habitat.* En attente de Parution, Revue Générale de Thermique.
- [TRNSYS 79] **TRNSYS.** *Manuel d'utilisation.* Madison (U.S.A.) : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, 1979. 1650 p.
- [Urban 91] **Urban, D.** *Microsoft Quick C/Windows : enfin !* Micro-systèmes, Octobre 1991, n° 123. p. 158-162.
- [Van Der Maas 92] **Van Der Maas, J.** *Air flow through large openings buildings.* Lausanne: International Energy Agency Annex 20 substask 2 technical report, LESO-PB, EPFL, 1992. 163 p.
- [Vasseur 91] **Vasseur, D.** *Windows 3.0 et la mémoire.* La Revue de l'Utilisateur PC, Octobre 1991, n°73. p. 48-52.
- [Walliser 77] **Walliser, B.** *Systèmes et modèles.* Paris : Seuil, 1977. 247 p.
- [Walton 82] **Walton, G.N.** *Airflow and multiroom thermal analysis.* ASHRAE Transactions, 1982, Vol. 88, Part. 2. p. 78-91.
- [Walton 84] **Walton, G.N.** *A computer algorithm for Predicting infiltration and inter-room airflows.* ASHRAE Transactions, 1984, Vol. 90, Part. 1B. p. 601-609.

- [Walton 89 a]                    **Walton, G.N.** *Airflow network models for element-based building airflow modeling.* ASHRAE Transactions, 1989, Vol. 95, Part. 2. p. 611-620.
- [Walton 89 b]                    **Walton, G.N.** *Considerations for advanced building thermal simulation programs.* Proceedings of Building Simulation '89, Vancouver, CANADA, 1989. p. 155-160.
- [Wright 92]                      **Wright, A.J., Lockley, S.R., Wiltshire, T.J.** *Sharing Data Between Application Programs in Building Design : Product Models and Object-Oriented Programming.* Building and Environment, 1992, Vol. 27, n°2. p.163-171.