FR9905644

SOCIÉTÉ FRANCAISE DES THERMICIENS

Journée organisée par la section Génie Climatique
(Président : F. Monchoux)

MASTER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED

REÇU LE
16. AVR. 1999
DIST / SCIBD

INNOVATIONS ET PERSPECTIVES

DE RECHERCHE

RECEIVED
AUG 12 1999
OSTI

Journée d'Études du Mercredi 26 Novembre 1997

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

SOCIÉTÉ FRANCAISE DES THERMICIENS

Journée organisée par la section Génie Climatique
(Président : F. Monchoux)

INNOVATIONS ET PERSPECTIVES

DE RECHERCHE

Journée d'Études du Mercredi 26 Novembre 1997

SOCIÉTÉ FRANCAISE DES THERMICIENS

Liste des participants à la journée du 26 novembre 1997

ACHARD Gilbert	ESIGEC-LGCH Université de Savoie Campus Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac Cedex
DEPECKER Patrick	CETHIL - INSA de Lyon/UCB Equipe TB - Bât 307 20 avenue A. Einstein 69621 Villeurbanne Cedex
DEQUE Francis	EDF-DER-ADEB Site des Renardières Route de Sens - Ecuelles 77818 Morêt sur Loing Cedex
FERMANEL Florence	Laboratoire GTMa INSA Rennes Avenue des Buttes de Coësmes 35700 Rennes
GAGNEAU Sophie	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées GISE 6-8 av Blaise Pascal Cité Descartes Champs sur Marne 77455 Marne la Vallée Cedex 2
LEBRUN Jean	LT Bâtiment B 49 Université de Liège au Sart Tilman B - 4000 LIEGE e-mail : J.LEBRUN@ULG.AC.BE
MONCHOUX Françoise	Université Paul Sabatier LESETH 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 4
MUSY Marjorie	LEPTAB Université de la Rochelle Avenue Marillac 17042 La Rochelle Cedex 1
NADEAU Jean-Pierre	LEPT ENSAM Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cedex

OLIVE Gilles	GOIC 83 Bd Macdonald 75019 Paris
PELLETRET Roger	CSTB BP 209 06904 Sophia Antipolis
PETIT Jean-Pierre	SFT-ECP Grande Voie des Vignes 92295 Châtenay-Malabry Cedex
ROUX Daniel	ESIM, Département G.T. IMT Technopôle de Château-Gombert 13451 Marseille Cedex 20
RUTMAN Emmanuel	CIAT Avenue Jean Falconnier 01350 Culoz
SIEKIERSKI Edouard	EDF-DER-ADEB Groupe E15 Technologie du confort thermique Site des Renardières Route de Sens - Ecuelles 77818 Morêt sur Loing Cedex
THELLIER Françoise	Université Paul Sabatier LESETH 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 4
WURTZ Etienne	LEPTAB Université de la Rochelle Avenue Marillac 17042 La Rochelle Cedex 1

LISTE DES COMMUNICATIONS

- J. Lebrun
« *Clima 2000 : conclusions et perspectives* »

- G. Olive
« *Approche normative des différents aspects du confort d'ambiance* »

- F. Thellier, F. Monchoux
« *Où en sont les méthodes d'évaluation de l'inconfort local* »

- P. Depecker, G. Achard
« *Vers une approche globale de la climatisation des bâtiments* »

- J.-P. Nadeau, J.-L. Battaglia, P. Sébastian
« *Simulation du comportement énergétique d'entités industrielles. Bilan d'actions réelles et évolutions méthodologiques* »

- R. Pelletret
« *Modélisation et simulation : un « état de l'art »* »

- M. Musy, E. Wurtz, S. Gagneau
« *Génération automatisée d'une simulation thermique et aéraulique dans le bâtiment* »

Report for session 10
Synthesis

by Jean LEBRUN,
Technical Committee Chair
University of Liège, Belgium

Introduction

The following notes were produced "on line", during the conference. A minimum of corrections and additions were a posteriori introduced, in order to make the text readable. But no attempt was made to "soften" the comments.

Such a report should , in no case, be considered as exhaustive, neither reflecting any consensus. It is nothing more than a set of subjective impressions collected by the author, along the nine previous technical sessions, after having read the corresponding reports (references 1 to 9).

Session 1 : Indoor Environment

Several questions were raised by the Rapporteur of this session about comfort criteria, standards and measuring techniques.

One of these questions is how to resolve the discrepancies between standards and field studies.

Responsibilities are shared by (too) many partners: architects, HVAC engineers, managers,... and occupants! If uncle Karl had attended the discussion, he would have found that there is still too much "work partitioning" in building story! Too often, we hear that "it doesn't matter, because somebody else will pay the bill...".

How to make building occupant happy? That is the question...

Some matters as relationship between Air Quality and human productivity deserve to be studied. Air Quality instruments should be cost effective!

Somebody said that engineering is not as famous as producing movies. It is true, and HVAC is surely not among the most prestigious engineering domains. We don't expect to meet very soon a customer speaking about HVAC in positive terms. Usually, the best we can get is that building occupants don't speak at all about HVAC...

HVAC engineers (as other ones) have to accept the fact that a lot of problems are NOT technical: we do have the technology, the information, the standards, etc...but we don't know how to convince the people to look at long term...

Listening to some of the questions raised about thermal comfort criteria, I also asked myself how to make a little more search than research. That's the danger with a too old Rapporteur: he has the impression of having already heard the same story before...

Let's try to fix better the "good" information we already have and go further in the applications...

Session 2 : HVAC Applications in Domestic, Industrial and Agricultural Buildings

The subdivision between sessions 2 and 3 ("non-commercial" and "commercial" buildings) is, of course, very arbitrary and many of the questions raised are not session-specific.

The Rapporteur claimed, among others, that "active" and "passive" HVAC measures should be combined together. He also observed that the "AC" part of HVAC is too often limited to the "C" (cooling).

It is true that moisture control is very often forgotten. This makes ambiguous the comparison between active and passive techniques. This ambiguity is typical when talking about "passive" (if not "exotic") ways of cooling the indoor environment...

We all have the dream of a global building design, supported by a global life cycle cost analysis, with caution to indoor environment, to energy management and to outside environmental protection!

One of the frustrations expressed by the Rapporteur as well as by other participants is that so few papers are dealing with cost analysis at very first stage of building design process! One of the difficulties is coming from the very temporary cooperation among the many partners involved in the building story. How could we have them trusting each other and cooperating effectively?

Too little attention is paid until now in Europe to building cooling techniques. Cooling has been almost ignored in most important Energy research and development programs... But the cooling demand is now quickly growing almost everywhere and many practical questions (about real comfort, energy and economics) stay unanswered.

How to deal with cooling in dwellings? How far is it possible to go with night cooling? What is the real price of "free" cooling? What are the real effects of such (semi)passive technique on energy consumption and on moisture control?

Let's accept the following fact: even in "temperate" climates, a lot of buildings (including dwellings) could not stay comfortable all along the year without some cooling. Ignoring it will not prevent building occupants to try to resolve their problem in their own way. But what will be the global impact of these individual solutions on energy use and environment?

In Europe, it is time to work on new standards, dealing with cooling loads calculations. This is a good matter of international cooperation: it is easier to agree on the way to calculate a requirement than on the way to satisfy it. The discussion we had at the end of the session about the interest of reversible heat pumps (in relationship with the way of producing electricity: proportion of hydroelectricity etc.) illustrates the difficulty of comparing specific solution's at international level..

Session 3 : HVAC Applications in Commercial Buildings

For various reasons (occupancy .density, internal loads, work constraints, customers requirement, prestige,...) these buildings are usually equipped with most advanced HVAC systems. "Building Energy Management Systems" (BEMS) are also more and more common in these buildings.

But one tentation we should resist, is to relate to the BEMS only, when having to monitor the system: it is a bit risky to ask a BEMS to monitor itself and even more to monitor the whole system when the BEMS has a problem!

As stated by the Rapporteur, simulation is in progress, but how much is it giving at different stages of building life cycle (BLC)?

Each one is asked to make an effort to promote a better use of simulation tools: manufacturers have to make more appropriate data available, scientists have to develop more "friendly" models and designers have to use simulation tools sooner in their design process...

BEMS evaluation is obviously still a hot point of discussion. BEMS is not a magical solution: it will not resolve problems raised by a wrong design of the building-HVAC system. But the BEMS contribution should be taken in consideration early enough in the design process (it should affect the early choices, the HVAC equipment selection and sizing, etc.).And it is impossible to promote a better BEMS use without talking again about one step of the BLC which has been almost "forgotten" (or "underscored") in these last years: the Commissioning.

I have to confess that I needed nearly thirty years to discover the real importance of Commissioning. Building and HVAC Commissioning is a unique opportunity of providing the designers, equipment producers and installers with some feedback about the quality of their work and about the real meaning of their work hypotheses. It is also a unique opportunity to tune a lot of practical information provided to the building manager (up-date the "As-Built" files).

It is, at the end, the only one way to establish a safe reference for further fault detection and diagnosis analysis.

BEMS will help a lot in developing continuous HVAC commissioning...if having been included itself in the initial commissioning!

This may look as obvious, but it is also more and more obvious that we should not trust BEMS sensors if not having them carefully commissioned.

Exhaustive commissioning takes time and money, but short-circuiting costs much more in long term.

And quantity will never replace quality: multiplying measuring points will not compensate their individual inaccuracies...

Session 4 : Energy, Environment and Economics

The Rapporteur helps us to stay optimistic: he observes the following positive points in the papers presented:

1. Increasing concern for environmental and economic implications in energy technology research;
2. Opportunities of combining energy savings with environmental protection and with creation of new jobs (for example renovation of heating plants);
3. Better understanding of interactions among HVAC energy use, chemical emissions and atmospheric warming.

But he also recommends political actions as well as further research on these complex interactions, mainly between energy savings and environmental protection.

Everybody agrees that energy, environment and economics need to be addressed simultaneously...but from where will come the motivations?
From legislation? From incentives? From penalties? Or from fashion?...

Session 5 : Control

"Control" is here understood in a broad sense: it includes various control levels (from "lower level" control to "upper level" energy management) as well as fault detection and diagnosis (FDD).

The Rapporteur provocates thinking on three topics:

1. Practical use of Physical Models;
2. Tuning of Control and FDD functions;
3. Choice among different levels of complexity for control and FDD functions.

Provocative statements (selected from the paper of the Rapporteur):

1. More research should be done on the practical use of physical models with focus on easy parameter identification and on data base maintenance all along BLC;
2. Easy tuning is more important than (hypothetical) performances of Control and FDD functions;
3. Functions developments should be much more user-oriented, i.e. with caution to all steps of BLC, including engineering, commissioning, tuning, operations and services,...

The discussion confirms that it is not yet obvious how to make a rational choice between physical and black box models.

Physical models can be generated at design stage, but they need parameter identification (there is no shame in ignoring their real characteristics!). The question is if we are ready to pay the real price for setting up physical models...

Another question is: "Does it matter if practitioners don't understand the operation ? (Back to what Karl called "work partitioning"?).

The effect of modeling and measuring errors is another point of concern: at least we have to know which errors are the biggest. We must recognize the fact that measuring errors do limit performances of fault detection schemes...

Session 6 : Refrigeration

There is a serious need for HVAC engineers to find their way in the very complex "refrigerants story". We should better say "refrigerants saga", because it is obviously not yet ended!

At least, the Rapporteur confirms us that R134a is, at present time, the best substitute for R12 (except in Germany ?) and that only mixtures could replace today R22.

In fact, a lot of usable mixtures already exist, but they are not very popular, may be because their use requires some learning...

Zeotropic mixings might provide some COP increase, thanks to smaller temperature differences across condenser and evaporator.

The real future of other refrigerants is still very uncertain; HC have great advantages, except for their flammability, and CO2 looks as a valuable candidate for some applications as car air conditioning (if we accept to go to much higher pressures).

There is still some reluctance in US and in Europe to use HC and NH3. But a lot of equipment is already installed (in Germany) and enormous progress was made in reducing the charge of NH3.

At the end, NH3 is a very safe refrigerant...

One crucial problem is the too early HFC's phase out date in European countries: there is no time enough for serious experiment and new compressors are not yet available. Europeans are not playing with HC, just for fun!

Anyway, it seems that more attention should be paid to "indirect" environmental impact of refrigerants in the future: we are having smaller and smaller "direct" impact thanks to less aggressive refrigerants, to tighter installation, with smaller charge,...but what about CO2 production at power plants?

Absorption machines might also come back, combined with cogeneration: using waste heat is, at the end, the only one rational solution!

Various sorts of combinations should be considered: in supermarkets for example, it seems interesting to combine AC with R and ice storage, in order to have smaller chillers with smaller refrigerant charge. It seems also interesting to "play" with different levels of temperatures: for example with two levels, when having a cooled ceiling combined with air dehumidifier.

Water could even be a satisfactory refrigerant for such application...

In short, let's say that "R" and "AC" have to work hand in hand ...

Session 7 : Building Physics

The Rapporteur claims that building physics and HVAC are different things and that they should be complementary. Should be, but...

We know that poor understanding of building physics increases dramatically "H" and "C" demands. We also know that crucial options are already taken at early design stages. After that, it's too late,...but there is a lack of research effort at that level. Too much attention is paid at latter stages!

"Performance" is a concept which should be continuously accessible from early design until experimental verifications.

And, by the way, even with the most sophisticated models, experiment stays necessary: even small defaults may have important consequences which couldn't be predicted by theoretical models !...

Session 8 : Experimental Methods and Model Validation

"Validation" shouldn't be considered as a magic word...As observed by the Rapporteur, too few papers are presenting real validation; most of them are dealing with modeling only.

In fact, before starting developing a model, it would be good to know:
-why we do it;
-what we are looking for;
-which information we are supposed to have in hand;
-and if there is any hope to validate anything.

Successful validation requires very clear definition of all inputs (all what is supposed to be known) and also of experimental accuracy. I know this looks obvious. At least let's accept the fact that a lot of things are true,...but will never be validated!

We should also distinguish better validation from calibration and model validation from design validation...

Two good advises to any validation candidate:
1)Don't make any experiment outside your lab and you will sleep better;
2)Watch carefully space and time variations of all variables you are playing with (wind is one of the most difficult variables to handle !).

It is today suggested to reserve "physical" models for component design and "grey" or "black" boxes for almost all stages of building life cycle...

My personal impression is that this choice would deserve much deeper discussion: detailed physical models could help a lot in commissioning, fault detection and diagnosis.

Simultaneous use of different modeling levels is welcome, when having to deal with monitoring of large energy systems.

Calculation is cheaper and cheaper, but measurement is more and more expensive. This justifies an extensive use of all calculation tools available...

Room air flow models are still best sellers...but they are also still generating a lot of questions:
-What to choose: CFD or lumped models?
-Could the models be used in the future to generate simple rules, usable at early design stages?...etc.

Documentation and validation of these models stay very necessary...

At least at present stage, when dealing with air diffusion problems, it's good to "keep a look" on the general air flow pattern (identify the jet trajectory). It might be also interesting to use CFD in order to generate lumped models, usable at different stages of the project.

By the way, after more than 30 years CFD is used by engineers, it's time to tell what we really expect from it!

Of course such question shouldn't be reserved to CFD: all models are challenged.

We should demonstrate we are not developing models only for our own intellectual satisfaction...

Session 9 : Modeling, Simulation Softwares and Applications

As for sessions 2 and 3, the splitting between 8 and 9 is a bit arbitrary. Questions raised by the Rapporteur are also related to the previous session:

-Why are we continuing to produce new models?

-Is there still a market for simplified models?

-Why using neural network models in place of other models ?

-Why aren't we combining lighting and thermal loads calculations (that makes a long time, we know we should...)?

etc...

Powerful simulations are possible today, in fictitious and real time, but bottle necks are located in the modeling, and also in the data management.

A lot of questions stay unanswered about fundamental data to be used in the simulation: heat and mass transfer correlations, etc. But the most urgent need is probably to orient simulation tools developments towards real user needs: we should have started from the actual practice!

Only in some (exceptional ?) cases, the software developers went to visit practitioners to discover their current work, before starting new development work.

Again here (as would have said uncle Karl) we have to fight against the "work partitioning": avoid keeping computer people isolated from practitioners...

Model complexity has to be adapted to the level of knowledge at each design stage and simplified tools must be derived from reference ones.

New modeling languages are under development; they may help for information exchanges.

But information is not the all of it: we need safe tools. It's urgent to agree on a certification procedure, before organizing the distribution of the models.

Some general conclusions

It is in the nature of such a "big" conference to generate a lot of frustrations: the domain concerned is too large and the participants expertises are too much dispersed.

Building business is a "carrefour" of (in)competencies:

A lot of regulations, standards, specifications, hypotheses, calculation methods are referred without common understanding among all partners concerned!

There also remains an important gap between research and current practice. Some CLIMA 2000 participants will say there are not enough practical results presented. Other ones would like to get more scientifical information.

Every specialist finds his own specialty as too poorly represented...

At least most of the partners concerned had here the opportunity to meet each other and to improve their mutual understanding. I feel this as the most urgent: having already in hands a lot of technical information, we should make it easier to be understood by all partners (and not only by specialists).

Better than rushing sometime towards very exotic solutions, we should make easier a correct use of the "classical" ones.

Let's try to (re)establish mutual confidence among all building partners.

Whatever could be our assumptions about the future (energy costs, environmental impact, etc.) and better than arbitrary promoting hypothetical 'solutions", let's cooperate in developing the tools (calculation methods, data bases, measuring techniques) which will make possible a rational choice among the many technical options already available...

REFERENCES

[1] Melikov A. Report for session 1, *Indoor Environment*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[2] Luscuere P. Report for session 2, *HVAC Application in Domestic, Industrial and Agricultural Buildings*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[3] Holmes M. Report for session 3, *HVAC Application in Commercial Buildings*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[4] Mitchell J. Report for session 4, *Energy, Environment and Economics*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[5] Tödtli J. Report for session 5, *Control*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[6] Krüse H. Report for session 6, *Refrigeration*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[7] Hens H. Report for session 7, *Building Physics*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[8] Braun J. Report for session 8, *Experimental Methods and Model Validation*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

[9] Pelletret R. Report for session 9, *Modeling, Simulation Softwares and Applications*, CLIMA 2000, Brussels 1997.

Gilles OLIVE (IC)

CONSEIL EN STRATEGIE TECHNOLOGIQUE

Villa Pasteur, 83 Bd Macdonald, 75019 Paris, France
Tel: 33 (0)1.42.05.45.24 / Fax: 33(0)1.42.05.64.69 / E-mail: g_olive@worldnet.fr
SIRET: 318.642.709.00048

Paris, le 26-11-97

Journée de la SFT sur le thème "Génie climatique"
26-11-97
ooo

Approche normative des différents aspects du confort d'ambiance

Gilles OLIVE

ooo

1 - L'intérêt de la normalisation des définitions des conditions de satisfaction des exigences de conforts spécifiques.

1.1 - Le confort d'ambiance dans un local d'un bâtiment est lié aux relations qu'entretient un occupant avec l'ambiance créée par ce local. Selon la nature de ces relations, il en résulte quatre aspects du confort d'ambiance (les conforts spécifiques hygrothermique, acoustique, visuel et olfactif) :

a) Echanges entre l'ambiance et l'occupant dans le cas du confort hygrothermique :
• Le confort hygrothermique est relatif à la nécessité pour l'être humain, homéotherme, de dissiper dans son environnement sa puissance métabolique (puissance interne produite), réduite de la puissance consommée par son activité physique. Cette dissipation se fait par la peau et les voies respiratoires, sous forme de chaleur sensible et de chaleur latente. Aux échanges hygrothermiques entre l'occupant et l'ambiance "hygrothermique", il correspond des réactions de l'occupant d'ordre :
- physiologique : réactions thermorégulatrices insensibles (sudation faible, etc.) et sensibles (sudation forte ou frissonnements).
- psycho-sociologique : sensations thermiques (de froid ou de thermoneutralité ou de chaud), moyennes ou locales, éphémères ou durables.
• En conséquence, l'occupant juge l'ambiance hygrothermique satisfaisante ou insatisfaisante. Il en résulte une exigence de confort hygrothermique consistant très généralement à ne vouloir avoir ni froid ni chaud.
• Si la dissipation de chaleur métabolique n'est pas effective durablement, il en résulte un problème de santé.

b) Actions de l'ambiance sur l'occupant dans les cas des conforts acoustique, visuel et olfactif :
• Les confort acoustique ou visuel ou olfactif sont relatifs à l'usage de l'ouïe ou de la vue ou de l'odorat pour s'informer sur son environnement acoustique ou visuel ou olfactif. Aux actions de l'ambiance "acoustique" ou "visuel" ou "olfactif" du local sur l'occupant, il correspond des réactions de l'occupant d'ordre :
- physiologique : perception de bruits ou de lumières ou d'odeurs (gaz odorants),

- psycho-sociologique : sensations acoustiques ou visuelles ou olfactives qui dépendent du fait qu'on veut plus ou moins entendre des bruits ou voir des objets et des lumières ou sentir des odeurs.

• En conséquence, l'occupant juge satisfaisante ou insatisfaisante l'ambiance acoustique ou visuelle ou olfactive. Il en résulte une exigence :

- de confort acoustique consistant très généralement à vouloir d'une part une écoute satisfaisante des bruits intérieurs, et d'autre part une absence de gêne par les bruits aériens (bruits venant d'autres locaux), les bruits d'impact et d'équipement, les bruits extérieurs. Si une ambiance sonore est de niveau sonore excessif ou trop gênante de manière durable ou si elle perturbe de manière durable l'activité vitale du sommeil, il en résulte un problème de santé;
- de confort visuel consistant très généralement à d'une part voir certains objets et certaines lumières (naturelle ou artificielles) sans être ébloui, et d'autre part avoir une ambiance lumineuse satisfaisante quantitativement en termes de luminances (flux lumineux émis dans une direction donnée par unité de surface apparente d'une source lumineuse ou d'une surface réfléchissante), et qualitativement en termes de couleurs. Si une ambiance visuelle est éblouissante ou nécessite des accommodations de l'oeil de manière durable, il en résulte un problème de santé;
- de confort olfactif consistant très généralement à vouloir d'une part ne pas sentir certaines odeurs, et d'autre part retrouver certaines odeurs.

1.2 - Ainsi, une exigence "i" (de confort d'ambiance spécifique) concerne des phénomènes, représentables par une fonction phénoménale fonction de variables Xi,j, appelées variables de définition des conditions de satisfaction de l'exigence "i". Cette exigence impose à ces variables des contraintes, appelées contraintes de définition des conditions de satisfaction de l'exigence "i".

Ces variables de définition sont relative à l'air du local, l'espace du local et les surfaces délimitantes du local. Pour chaque type de confort, ces variables sont les suivantes :

a) pour le confort hygrothermique :
- variables concernant l'air : champs des caractéristiques hygrothermiques de l'air intérieur (température, humidité relative, vitesse),
- variable concernant l'espace : champ de température radiante moyenne,
- variable concernant les surfaces délimitantes : température des surfaces.

b) pour le confort acoustique :
- variable concernant l'air : champ des intensités acoustiques,
- variable concernant l'espace : champ de durée de réverbération.

c) pour le confort visuel :
- variables concernant l'espace : champs de luminance et de couleur des flux lumineux,
- variables concernant les surfaces délimitantes : luminance et couleur des surfaces.

d) pour le confort olfactif :
- variable concernant l'air : champ de concentrations de gaz odorants.

1.3 - Par le biais des phénomènes en cause, ces variables de définition Xi,j sont fonctions de variables Yk,l, appelées variables de réalisation des conditions de satisfaction de l'exigence "k", où "k" est entre autre égal à "i".

Ces variables de réalisation correspondent aux caractéristiques des moyens de réalisation des conditions de satisfaction de l'exigence "k". Ce sont les paramètres de traitement du bâtiment et de ses équipements nécessaires pour réaliser les conditions de satisfaction de l'exigence "k" dans le local :
- traitement des parois opaques,
- traitement des parois vitrées,
- traitement des ambiances par des équipements traitant l'air (renouvellement d'air, chauffage aéraulique, refroidissement de l'air, traitement de la qualité de l'air), dit traitement "ouvert",
- traitement des ambiances par des équipements ne traitant pas l'air, dit traitement "fermé".

L'ensemble des contraintes de définition ont des implications sur les variables de réalisation en leur imposant des contraintes, appelées contraintes de réalisation des conditions de satisfaction de l'exigence "i".

1.4 - C'est à partir des variables de définition des conditions de satisfaction de l'exigence d'un confort spécifique et des contraintes auxquelles elles sont soumises qu'on définit la qualité d'ambiance spécifique du local. En effet, cette qualité correspond aux caractéristiques de l'ambiance du local qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire l'exigence de confort spécifique.

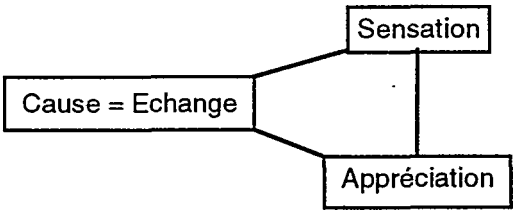
C'est à partir des variables de réalisation des conditions de satisfaction de l'exigence d'un confort spécifique et des contraintes auxquelles elles sont soumises qu'on définit la qualité spécifique du local. En effet, cette qualité correspond aux caractéristiques du local et de ses équipements qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire l'exigence de confort spécifique.

1.5 - Si on peut normaliser les définitions des conditions de satisfaction des exigences de conforts spécifiques, c'est-à-dire fournir des référentiels pour ces conditions, l'ingénierie de la construction et de l'adaptation des bâtiments peut en déduire des référentiels pour les qualités spécifiques des locaux, dont l'utilité est évidente.

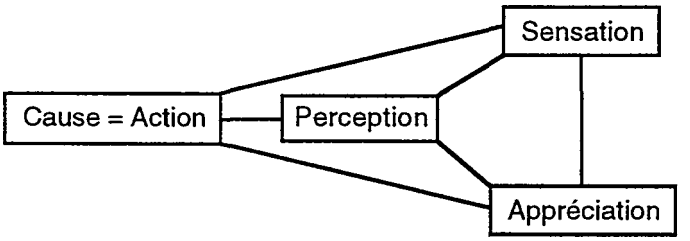
Ces définitions des conditions de satisfaction des exigences de conforts spécifiques supposent celles :
a) de corrélations entre chaque relation physico-physiologique spécifique de l'occupant d'un local avec son ambiance et chaque appréciation spécifique de satisfaction ou d'insatisfaction que l'occupant porte sur l'ambiance spécifique, qu'on appellera ultérieurement corrélations "cause-appréciation", où la cause est un échange dans le cas du confort hygrothermique ou une action (bruit, lumière ou concentration de gaz odorant) sur un sens dans le cas des autres conforts spécifiques;
b) ou d'ensembles de corrélations recomposant les corrélations précédentes, dont les composantes sont :
- des corrélations entre chaque relation physico-physiologique spécifique de l'occupant d'un local avec son ambiance et les sensations spécifiques induites, qu'on appellera ultérieurement corrélations "cause-sensation",
- des corrélations entre chaque sensation spécifique et chaque appréciation spécifique de satisfaction ou d'insatisfaction que l'occupant porte sur l'ambiance, qu'on appellera ultérieurement corrélation "sensation-appréciation",

- des corrélations entre chaque perception spécifique et chaque sensation ou appréciation spécifique, qu'on appellera ultérieurement corrélation "perception-sensation" ou "perception-appréciation",

Ces ensembles de corrélations correspondent aux structures relationnelles suivantes :
- pour le confort hygrothermique :



- pour les conforts acoustique, visuel et olfactif :



2 - La normalisation de la définition des conditions de satisfaction de l'exigence de confort hygrothermique.

Il existe une norme internationale concernant le confort hygrothermique : la norme EN ISO 7730 de 12-95 sur les "Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique". Cette spécification des conditions de confort thermique, sous forme de recommandations, s'appuie sur deux relations, établies par P.O. FANGER :

• une première relation entre d'une part le métabolisme de l'occupant d'un local et la dissipation énergétique possible du corps de l'occupant dans l'ambiance et d'autre part la déclaration prévisible de l'occupant en termes de sensation thermique, sous la forme d'un vote moyen prévisible (Predicted Mean Vote), qui se réfère à une échelle à 7 niveaux (chaud, tiède, légèrement tiède, neutre, légèrement frais, frais, froid).

On a : $PMV = (0{,}303\ e^{-0{,}036\ M} + 0{,}028)\ (M - W - PE)$, où "M", "W" et "PE" sont respectivement la puissance métabolique, la puissance consommée par l'activité physique, la puissance échangée avec l'ambiance (dans les conditions de confort pour ce qui est la température de peau et la sudation). C'est une corrélation "cause-sensation".

• une deuxième relation entre la déclaration prévisible de sensation thermique et la déclaration prévisible de satisfaction, sous la forme d'un pourcentage prévisible d'insatisfaits (Predicted Percentage of Disatisfied) qui établit une prévision quantitative du nombre de personnes insatisfaites pour un PMV donné.

On a : $PPD = 100 - 95\ e^{-(0{,}03353*PMV^4 + 0{,}2179*PMV^2)}$. C'est une corrélation "sensation-appréciation"

La norme recommande que le PPD soit inférieur à 10 %. En conséquence, elle fournit des recommandations sur les caractéristiques moyennes des ambiances (température opérative et vitesse moyenne d'air), et pour l'homogénéité des ambiances (variation verticale de la température d'air, température superficielle du sol, asymétrie de température superficielle des parois verticales, asymétrie de température superficielle des parois horizontales).

Depuis des PPD spécifiques ont été établis concernant les facteurs d'hétérogénéité précédemment indiqués.

La corrélation "cause-sensation (PMV)" est fondée statistiquement. On peut cependant se demander si pour un occupant habitué à des conditions climatiques non tempérées (climats chauds et parfois humides, ou froids), le calage du "PMV = 0" sur les conditions de thermoneutralité (PE = 0) est pertinent.

Pour ce qui est de la corrélation "sensation-appréciation(PPD)", on peut faire les deux remarques suivantes :
a) Il semble que pour un occupant habitué à des conditions climatiques tempérées, il y a une dissymétrie d'insatisfaction : l'insatisfaction est plus forte au froid qu'au chaud. Ceci est confirmé par des études s'appuyant sur le critère de préférence.
b) La corrélation "sensation-appréciation" n'a pas été établie statistiquement simultanément à l'établissement de la corrélation de sensation. On n'a pas demandé aux sujets de l'expérimentation leur sensation et leur appréciation, mais uniquement celle-là. Et l'appréciation a été déduite selon la règle : une insatisfaction correspond à un vote autre que +1 ou 0 ou +1.
Premièrement, le PPD n'est pas fondée statistiquement. Deuxièmement, cette déduction de l'appréciation de la sensation suppose que quelque soit la valeur du PMV, les "satisfaits" sont ceux qui ont voté entre -1 et +1. Cette hypothèse n'est pas vraiment justifiée, ne serait-ce qu'à cause de la première remarque. De toute façon, avec cette hypothèse, on ne peut pas s'étonner d'aboutir à une loi du type loi normale de distribution.

3 - La normalisation de la définition des conditions de satisfaction des exigence de confort acoustique, visuel et olfactif.

3.1 - Il n'existe pas de norme relative à ces trois types de confort.

Ceci se comprend lorsqu'on sait que, pour ces types de confort :
- la dimension psychologique et parfois sociologique de la sensation devient importante. La corrélation entre perception et sensation est moins physiologique que celle entre échange et sensation.
- la dimension psychologique et parfois sociologique de l'appréciation devient également importante.

Il en résulte une complexité de génération de la sensation et de l'appréciation :
• Pour le confort acoustique : Une sensation de gêne acoustique par rapport à un bruit qu'on souhaite entendre est provoquée par le fait qu'on l'entend mal. Une sensation de gêne acoustique par rapport à des bruits qu'on ne souhaite pas entendre est provoquée par le fait que le bruit d'ambiance (ensemble de bruits habituels) est de niveau sonore trop élevé, ou par le fait qu'un bruit "perturbateur" émerge du bruit d'ambiance.

• Pour le confort visuel : Une sensation visuelle a un fondement photométrique et colorimétrique. L'hétérogénéité de l'ambiance visuelle est l'objet d'appréciations contradictoires.
• Pour le confort olfactif : Une sensation olfactive est liée au caractère hédonique de l'odeur, fortement marqué par la mémoire. Le mélange de gaz odorants est ressenti de manière variée, incluant un phénomène de masquage d'odeurs désagréables isolément par des odeurs agréables.

De toutes façons ces sensations spécifiques sont marquées par les perceptions spécifiques qui les provoquent. Par ailleurs ces perceptions varient toutes selon le logarithme de l'excitation (= cause) :
- le niveau d'intensité acoustique perçue est de la forme : $L = 10 * \log (I / Io)$, où "I" est l'intensité du son à la réception, et dépend de sa fréquence,
- la performance de l'oeil suit également une loi logarithmique et dépend de la longueur d'onde de la lumière et des contrastes des éclairements de l'oeil,
- l'intensité odorante perçue est de la forme : $I = k\ C^n$ (loi de STEVENS), où "C" est la concentration de gaz odorant.

Les corrélations "cause-sensation" sont peu nombreuses, souvent spécialisées et d'une fiabilité limitée. Les corrélations "sensation-appréciation" sont encore plus rares.

3.2 - Dans ce cadre ingrat et pour répondre à un problème croissant d'insatisfaction olfactive dans certains locaux, P.O. FANGER a défini la notion une qualité de l'air perçu, à partir du milieu des années 80, selon la démarche suivante :
• Prendre comme référence le taux d'émission de polluants atmosphériques (bioeffluents) d'une personne-type et défini comme 1 "olf".
• Déterminer l'insatisfaction causée par une ambiance polluée par 1 [olf] et ventilée selon le débit "q" en [litre/seconde] par une loi statistique d'insatisfaction "PD", exprimée en pourcentage :

Loi 1 : $PD = 395 * e^{-1,83*q^{0,25}}$, si $q \geq 0,32$ [$l.s^{-1}.olf^{-1}$]; $PD = 100$, si $q < 0,32$. C'est une corrélation "cause-appréciation".
• Evaluer d'autres sources polluantes en olfs par l'insatisfaction qu'elles provoquent.
• Evaluer une pollution atmosphérique intérieure quelconque selon la pollution d'air perçue, exprimée en "décipol" (= 0,1 [olf.seconde/litre]) ou [dp], à partir de la loi statistique d'insatisfaction PD :

Loi 2 : $PD = 395 * e^{-3,25*C^{-0,25}}$, si $C \leq 31,3$ [dp]; $PD = 100$, si $C > 31,3$ [dp]. C'est une corrélation "perception-appréciation".

3.3 - Cette démarche mérite quelques remarques :

a) <u>Définition de l'unité "olf"</u> : Elle est définie comme le taux d'émission de bioeffluents d'une personne type (sédentaire, en équilibre thermique, ayant une hygiène équivalente à la prise de 0,7 bain par jour). La composition des bioeffluents étant variable, il faudrait étudier, si cela n'a pas encore été fait, comment les variations de cette unité influence son utilisation.

b) Relation entre les unités "olf" et "décipol" :

• Le "décipol" est défini comme la pollution de l'air perçue olfactivement provoquée par une source de 1 [olf], dans un local ventilé par 10 [$l.s^{-1}$] d'air non pollué. Cette définition se déduit de l'équation : $C_i = C_e + 10 * G / q$, où :

- C_i : pollution perçue de l'air du local en [dp],
- C_e : pollution perçue de l'air extérieur en [dp],
- G : taux d'émission de polluants odorants d'une source intérieure au local en [olf].
- q : débit volumique de renouvellement d'air, en [$l.s^{-1}$].

Cette équation suppose une corrélation "action-perception" constante.

• Une pollution perçue exprimée en [dp], et qui semble plutôt relever de la notion de perception, dépend de "q". Ce qui rend délicate l'utilisation de cette unité. En acoustique, la relation "cause-perception" entre pression ou intensité ou puissance acoustique d'une part et perception exprimée en [dB(A)] d'autre part n'a pas ce défaut.

• L'équivalence entre les taux d'émission de polluants odorants de deux sources dans un local, exprimés en [olf], se déduit de l'équivalence des pollutions perçues, exprimées en [dp], provoquées par ces deux sources séparément dans le même local ventilé de la même manière. Vu la difficulté de définir l'équivalence entre deux odeurs et encore plus entre deux mélanges d'odeurs, le développement pratique d'une base de données sur la détermination en [olf] des taux d'émission de polluants odorants risque d'être délicat.

• La relation linéaire entre "olf" et "décipol" fait que l'additivité de l'un entraîne celle de l'autre, lorsque les taux de ventilation sont invariants. Or, d'après sa définition comme taux d'émission de polluants odorants, l'olf est une grandeur physique additive. Le décipol est donc également additif. Ce qui ne peut que laisser perplexe lorsqu'on se réfère à l'enchaînement suivant : l'additivité des taux d'émission entraîne bien celle des concentrations, mais celle des concentrations n'entraîne pas celle des intensités perçues.

• Par définition, la relation entre "olf" et "décipol" est linéaire. Cette linéarité est pour le moins étonnante si on se réfère aux fonctions puissances généralement admises pour définir l'intensité perçue d'une odeur.

c) Pourcentage d'insatisfaits PD :

• La loi 1 est une relation entre une cause (taux d'émission de bioeffluents d'une personne type correspondant à 1 [olf] et taux de ventilation en [$l.s^{-1}$]) et une appréciation.

• La loi 2 est une relation entre une perception (pollution perçue de l'air) et une appréciation.

• Cette différence de nature relationnelle entre ces deux lois est probablement due au processus apparemment utilisé pour généraliser cette quantification :

- Fondement expérimental de l'insatisfaction causée par un type de source odorante (une personne-type), donc de la relation "cause-appréciation". Apparemment, la seule chose qui ait été demandée aux juges est leur éventuelle insatisfaction en entrant dans le local. Apparemment, la sensation induite par la cause n'a pas fait l'objet d'un jugement.
- Définition conjointe de l'olf (cause) et du décipol (perception).
- Utilisation de ces unités pour évaluer d'une part d'autres types de sources odorantes et d'autre part des ambiances odorantes créées par d'autres ensembles de sources odorantes que ceux ayant servi à l'expérimentation fondatrice.

d) Qualité de l'air perçue :

• Il est clair que la qualité de l'air perçue est évaluée par l'appréciation d'une ambiance odorante.

• En conséquence, et en se référant à ce qui a été dit sur les corrélations "cause-sensation (PMV) et "sensation-appréciation (PPD)" pour le confort hygrothermique, on peut dire qu'il y a eu, dans l'étude de l'exigence de confort hygrothermique et dans l'étude de l'exigence de confort olfactif, création de problèmes méthodologiques symétriques :

- dans l'approche des ambiances hygrothermiques : la corrélation "cause-sensation" est moins problématique que la corrélation "sensation-appréciation", déduite de la première,
- dans l'approche des ambiances olfactives : la corrélation "cause-appréciation" est moins problématique que la corrélation "perception-appréciation".

4 - Conclusions.

• La norme sur la définition des conditions de satisfaction de l'exigence de confort hygrothermique pose quelques problèmes concernant l'établissement de la corrélation "sensation-appréciation" et concernant la généralité d'application de la corrélation "cause-sensation".

• La tentative de normalisation de la définition des conditions de satisfaction de l'exigence de confort olfactif pose quelques problèmes concernant la généralité d'application de la corrélation "cause-appréciation" et concernant l'établissement de la corrélation "perception-appréciation".

• En définitive, il n'y a pas actuellement de normes sur les définitions des conditions de satisfaction des exigences de confort acoustique, visuel et olfactif, du fait de la grande difficulté de leur établissement.

• Sans vouloir à tout prix avoir des normes de conforts spécifiques, l'imperfection de celle qui existe et les difficultés de maîtrise des conforts spécifiques pour lesquels il n'existe pas de normes, induit quand même la nécessité de recherches pour aboutir à de meilleures définitions des conditions de satisfaction des exigences de conforts spécifiques.

Le GPQA (Groupe de Pilotage sur la Qualité des Ambiances), créé en 05-95 à l'initiative du Plan Construction et Architecture et la Direction de l'Habitat et de la Construction du Ministère chargé du Logement, a engagé des travaux, en particulier sur le confort d'ambiance, mais selon une approche globale. Aussi, on ne peut qu'encourager les équipes de chercheurs à travailler sur les conforts spécifiques d'ambiance des locaux des bâtiments dans la perspective d'une meilleure maîtrise des définitions des conditions de satisfaction des exigences de conforts spécifiques.

ooo

SOCIETE FRANÇAISE DES THERMICIENS

Journée d'Etude du 26 Novembre 1997

Section : Génie Climatique

Où en sont les méthodes d'évaluation de l'inconfort local ?

Françoise THELLIER, Françoise MONCHOUX

L.E.S.E.T.H. - Laboratoire Étude des Systèmes et de l'Environnement Thermique de l'Homme
Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, - F-31062 TOULOUSE Cedex 4

Résumé

Le génie climatique a pour but de procurer une meilleure qualité de vie aux occupants d'un bâtiment. Cela contraint le concepteur à analyser tous les aspects du confort : acoustique, thermique, olfactif, visuel, ...

Les normes permettent de créer des situations globalement satisfaisantes, mais parfois dégradées. Nous nous intéressons ici uniquement au confort thermique local, peu analysé dans l'habitat, ni facile à cerner. Cet aspect est malheureusement souvent oublié dans les phases de développement d'un projet.

Une revue est faite sur les différentes méthodes utilisées actuellement, en Europe essentiellement, pour évaluer les gênes locales subies par un individu. Il s'agit surtout de consignes appliquées aux paramètres physiques de l'environnement.

Il apparaît que, dans l'habitat, peu d'études sont en cours dans ce domaine et que les principales avancées viennent de l'analyse de conditions plus contraignantes comme celles que l'on trouve dans les transports. Plusieurs méthodes sont présentées : analyse des paramètres locaux, physiques, physiologiques ou thermosensoriels. Ces études sont faites soit par la mesure des conditions thermiques, soit grâce à l'utilisation d'un mannequin thermique, soit encore grâce à l'utilisation de modèles de thermorégulation humaine.

Nous insistons davantage sur cette dernière approche et les méthodes développées au LESETH depuis plus de dix ans.

1. Introduction

En matière de confort thermique, sous l'aspect thermophysiologie et/ou interaction entre l'homme et son environnement, le génie climatique ne se préoccupe le plus souvent que du confort thermique global.

Les méthodes d'évaluation du confort global sont nombreuses et relativement simples d'utilisation. Il s'agit d'indices ramenant à un chiffre unique un grand nombre de paramètres physiques : ceux de l'ambiance, même si elle est complexe, et ceux de l'individu. La valeur de ces indices doit se situer dans une plage correspondant à des conditions permettant d'assurer un confort global à une majorité de personnes (PMV, WBGT, Tset,...).

Ces indices sont en général valables uniquement en conditions thermiques homogènes et stationnaires. La norme ISO 7726 relative aux méthodes de mesure donne les définitions suivantes :

- "Une ambiance est considérée comme *homogène* si les paramètres d'ambiance autour du sujet peuvent être considérés comme uniformes, c'est-à-dire lorsque les écarts entre chacune des grandeurs et leur valeur moyenne n'excède pas ± 5 %". Pour cette détermination, la position recommandée des points de mesure par rapport au sol est la suivante : niveau tête (assis : 1,1 m ou debout : 1,7 m), tronc (0,6 ou 1,1 m), chevilles (0,1 m). La valeur moyenne spatiale est alors la moyenne des valeurs en ces trois points.

- "Une ambiance est dite *stationnaire* si les paramètres d'ambiance autour du sujet peuvent être considérés comme indépendants du temps, c'est-à-dire lorsque les fluctuations de chacune des grandeurs par rapport à leur valeur moyenne n'excèdent pas ±5 %".

L'estimation du confort thermique global est une première approche qui peut être satisfaisante pour des ambiances relativement homogènes en températures d'air et de parois et en vitesse d'air. Or, ces situations simples et idéales ne sont pas si courantes : mur mal isolés, bouches de soufflages mal positionnées, et rapidement de grosses inhomogénités apparaissent.

Dans l'habitat, on peut considérer que les conditions sont relativement stationnaires, mais rarement homogènes, et même si "le concept de température moyenne permet de simplifier l'étude, il présuppose de l'identité sur l'homme de l'environnement réel généralement hétérogène et de l'environnement virtuel défini comme homogène...." [ISO 7726]. Or, des conditions moyennes produisant un confort thermique global peuvent induire des problèmes locaux compte tenu des réactions physiologiques.

Si le confort global semble facile à estimer, il n'en est pas de même pour le confort local. Mais peut-on réellement parler de confort local ? Il semble plus adapté de parler d'inconfort local, car, le plus souvent, c'est en ces termes que l'individu s'exprime : "je me sens globalement confortable, mais j'ai un peu froid aux pieds".

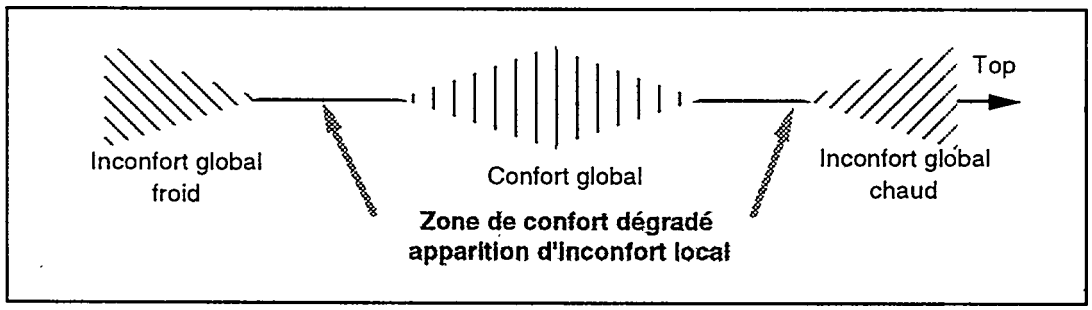


Figure 1 : Schématisation de l'évolution du "confort ou de l'inconfort" en fonction de la température opérative de l'ambiance.

Sur un axe représentant la température opérative, on peut définir diverses zones (Fig. 1) :

- une zone centrale où le confort global et le confort local vont pouvoir être possibles : physiologiquement, cette zone correspond à la thermoneutralité : le bilan thermique du corps humain est équilibré et subit des réactions physiologiques de régulation minimales ;

- deux zones extrêmes où manifestement l'individu sera en situation d'inconfort global froid ou chaud ; il y a apparition de fortes réactions physiologiques : frissons, transpiration, ... ;

- entre ces zones peu faciles à délimiter clairement se situent des zones de confort dégradé, vers le froid ou le chaud ; elles correspondent aux situations où apparaissent le plus souvent des problèmes d'inconforts locaux.

On ne sait pas actuellement comment passer du confort ou de l'inconfort local au confort ou à l'inconfort global. Peut-on dire que si toutes les parties du corps sont confortables l'individu déclarera un confort global ? Par contre, l'inverse paraît plus clair : si toutes les parties du corps sont inconfortables, il est à prévoir que l'individu déclarera un inconfort global.

Il faut souligner que l'inconfort local peut engendrer des problèmes qui dépassent une simple gêne. Par exemple la baisse de la température des doigts d'une secrétaire diminue leur sensibilité et engendrera un plus grand nombre de fautes de frappe. Dans des situations plus particulières, comme la voiture, les conditions sont thermiquement plus complexes et provoquent rapidement un inconfort local marqué. Cela peut engendrer une baisse de vigilance ou pousser le conducteur à avoir des réactions comportementales (lâcher le volant pour se réchauffer les mains, par exemple) qui peuvent occasionner de graves conséquences. Il faut donc avoir des méthodes performantes d'analyse ou de prédiction de l'inconfort local.

2. Les méthodes utilisées dans l'habitat

2.1. Les normes ISO

Les normes relatives au confort en vigueur actuellement en France [Normes ISO 7730], ne donnent pas de méthode pour calculer l'inconfort local, mais énoncent uniquement des recommandations afin d'en limiter les risques. Les valeurs données s'appuient sur des courbes présentant en abscisse la cause d'inconfort et en ordonnée le pourcentage d'insatisfaits (exemple en Fig. 2). Les causes répertoriées sont : les asymétries de rayonnement verticales et horizontales, la température des planchers chauds ou froids, les différences verticales de températures d'air, les courants d'air. La limite acceptable du nombre d'insatisfaits est en général inférieure à 10 %, ce qui permet de déduire la valeur nominale du paramètre physique en question, valeur qui doit être respectée au centre du local [Olesen, 1985].

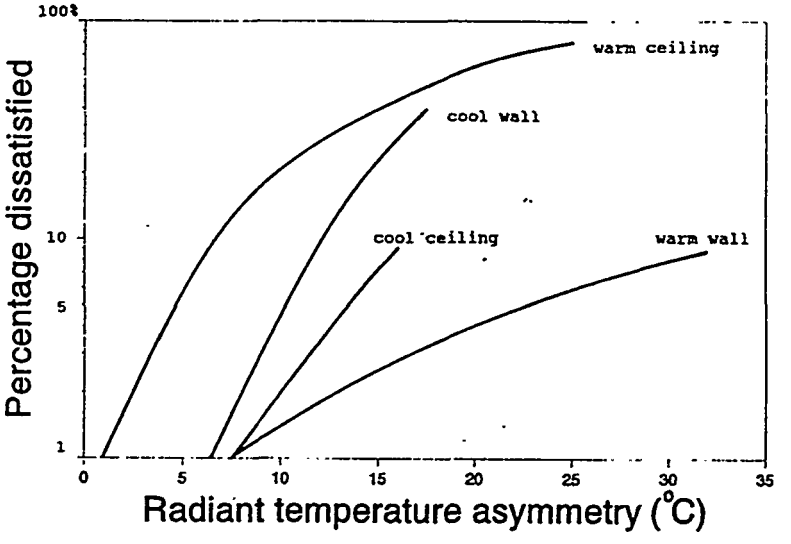


Figure 2 : Pourcentage d'insatisfaits pour différentes configurations [Parsons, 1994]

2.2. Le profil U.C.R.E.S.

Une tentative a été faite avec le profil UCRES pour obtenir une sorte d'indice qui donne une idée de l'inhomogénéité d'une ambiance thermique [Dessagne 1985]. Il s'agit des "5 types de gênes thermiques" cités dans les normes. A chacun est associée une note liée à l'intensité de la gêne (0=confort ; 1=léger inconfort; 2= inconfort net), dont les valeurs sont données dans le tableau 1.

	Classe de gêne		
	0	1	2
Uniformité horizontale (1)	±1,5 °C	±1,5 à ±2,5	<± 2,5
Courant d'air (2)			
Asymétrie de **R**ayonnement (avant/arrière)	<8°C	8 à 12 °C	> 12°C
Écart de température d'air tête/pieds	< 3°C	3 à 5°C	> 5°C
Température du **S**ol	17 à 26°C	15 à 17 °C 26 à 28°C	< 17°C > 28°C

Tableau 1 : Correspondance entre les types de gêne et leur classe

(1) L'uniformité horizontale est calculée à partie de l' I.C.T.G (Indice de Confort Thermique Global)

$$I.C.T.G. = T_{opc} - T_{op}$$

T_{opc} Température opérative au centre du local
T_{op} Température opérative moyenne de trois points pris le long d'une verticale.

(2) La gêne due au courant d'air est liée à la température effective du courant d'air

$$T_{ec} = T_a - T_{ac} - 7{,}66(V_a - 0{,}15)$$

T_{ac} Température d'air au milieu de la pièce,
T_a Température d'air locale.

Dans les calculs, le malaise du au froid est traité séparément de celui dû au chaud. Les gênes sont mesurées et/ou calculées en chaque point de l'espace, selon un maillage tridimensionnel dans la zone d'occupation. La fréquence d'apparition f_i de chaque classe i est calculée. On en déduit alors une note relative à chaque gêne :

$$N = 1{,}8\ Ln(\ 1 + 3\ f_1 + 15\ f_2)$$

Un exemple est donné sur la Figure 3. L'allure du profil final donne une idée de l'hétérogénéité d'ambiance dans le local, étant entendu que les conditions de confort sont atteinte pour N = 0. Cette méthode a, semble-t-il, été abandonnée bien qu'elle paraisse riche malgré la manière simple de regrouper les causes multiples d'inconfort de la totalité du local.

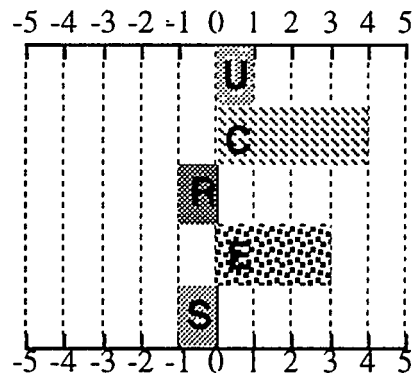


Figure 3 : Exemple de Profil UCRES

2.3. Les autres études

De nombreuses études ont été publiées sur les diverses causes de l'inconfort local. Elles ne sont pas toujours claires et surtout peu applicables toutes à la fois. Il s'agit par exemple du nombre

d'insatisfaits en fonction de la provenance du courant d'air ou bien de la température et de la nature des objets en cas de contact, etc.

Dans presque tous les cas, les résultats sont donnés sous forme de courbes ou d'expressions mathématiques reliant un ou plusieurs paramètres physiques à un jugement thermique, affectif, sensoriel ou un pourcentage d'insatisfaits.

Dans la plupart des études, le nombre indiqué de personnes insatisfaites a été déterminé grâce à des votes effectués par des sujets soumis à une cause principale d'inconfort local mais dans une ambiance "globalement confortable ou thermo-neutre". Aucune corrélation n'existe pour traiter les cas où divers risques d'inconfort se conjuguent ou bien ceux où la personne se trouve déjà en situation de confort global légèrement dégradé.

Ces études peuvent permettre de comprendre les causes de l'inconfort, mais ne peuvent en aucun cas être utilisées par des concepteurs de façon simple.

2.4. Conclusions

Si l'on travaille sur la réponse de l'être humain à des stimuli thermiques, l'analyse locale des variables physiques ou même physiologiques n'est pas suffisante car la thermorégulation humaine est un système non linéaire. Inversement, s'il est évident que l'analyse sensorielle est indispensable, elle ne peut se faire sans tenir compte des aspects physique et physiologique afin de comprendre les phénomènes mis en cause et qui sont à l'origine des réactions de l'individu.

Limiter l'analyse des situations provoquant un inconfort local à l'étude d'un ou éventuellement de plusieurs paramètres physiques fait complètement abstraction du fait que toutes les parties du corps humain sont liées les unes aux autres et que le corps n'est pas un système passif. Le système de thermorégulation joue un rôle complexe dans la répartition des températures cutanées. Le but de ce système est de maintenir la température centrale constante mais au prix de la dégradation du confort local. En effet, si l'individu a légèrement froid, sans même qu'il en ait conscience, il peut y avoir un début de vasoconstriction qui va diminuer le flux sanguin et donc l'apport de chaleur dans les extrémités. Il se plaindra donc d'avoir froid aux pieds ou au mains, mais la cause de ce phénomène sera peut être ailleurs.

Un inconfort local peut être provoqué par un flux de chaleur localement important, mais aussi par une réaction non contrôlée du système de thermorégulation qui dépend évidement de l'état thermique global et même local. L'homme n'a pas forcément conscience de ce déséquilibre, la seule notion qui est importante pour lui s'exprime en termes de confort ou d'inconfort et, éventuellement de façon plus objective, en termes de froid ou de chaud.

3. Les méthodes utilisées en situation très hétérogène

Dans les environnements fortement hétérogènes, les problèmes d'inconfort local risquent de se présenter de façon beaucoup plus cruciale. Il est évident qu'on ne peut plus se limiter alors à la notion de confort thermique global. De nombreuses études ont été faites dans le domaine des transports (voiture, camion, grues, etc.). L'espace y est confiné, les parois sont composées de matériaux divers entraînant des températures de surface très différentes.

Par exemple, dans une voiture stationnée à l'extérieur, les températures internes de l'habitacle peuvent être de -10 °C en plein hiver et atteindre 90°C en été au soleil. Les systèmes de chauffage et de climatisation doivent être conçus pour ramener l'ambiance à des conditions thermiques où le confort global et local est possible. Le seul moyen dont on dispose réellement est la régulation sur la température de l'air. Il peut donc apparaître rapidement des différences importantes entre les flux convectifs et radiatifs et une très forte non homogénéité entre les zones selon qu'elles sont plus ou moins proches des bouches de soufflage.

3.1. Analyse des paramètres physiques et/ou physiologiques

* **Utilisation locale du PMV** : Certaines études utilisent le PMV [Lin, 1992], calculé ou mesuré localement. Cette utilisation est contestable et, même si elle permet d'avoir une idée grossière des conditions thermiques, les résultats ne peuvent pas être significatifs. Comme tout indice, le PMV n'est utilisable que dans les conditions dans lesquelles il a été établi.

En effet, dire que le PMV des pieds est de +2 par exemple revient à sous-entendre que si une personne, couverte entièrement d'une isolation vestimentaire correspondant à celle des chaussures, était placée dans cette situation thermique supposée homogène, elle déclarerait avoir chaud. Or, les équations de bilan thermique sur lesquelles est basé le PMV ne sont établies que pour le corps entier, en particulier en ce qui concerne le calcul de la température de peau qui est celle qu'aurait une personne en situation de confort. Il est à noter que pour une même température de peau, chaque segment du corps n'aurait pas la même sensation.

* **Température équivalente locale** : Une étude réalisée dans les cabines de camions et de grues [Holmer, 1995] montre qu'il existe une corrélation entre les flux locaux et le Vote Thermique Moyen (MTV, qui utilise une échelle en 7 points, de -3 froid à +3 chaud). Les flux locaux sont mesurés grâce à un mannequin thermique sec et convertis en température équivalente (ET).

Par ailleurs, des expériences ont permis d'établir une relation entre la température Équivalente et le Vote Thermique Moyen. Les corrélations existent pour 18 segments corporels. Les relations sont différentes pour l'été et l'hiver. Un exemple est donné sur la Figure 4.

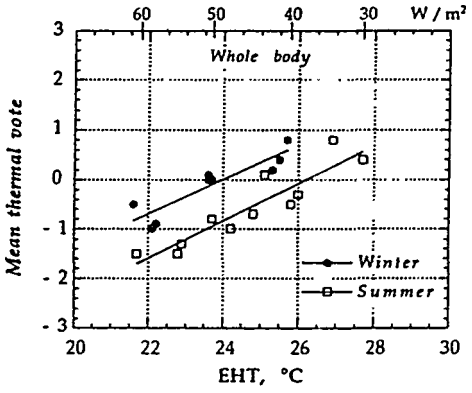


Figure 4 : Corrélation entre Vote Thermique Moyen, flux de chaleur et Température Équivalente pour le corps entier [Holmer, 1995]

Il est ensuite considéré qu'un vote compris entre -0,8 et +0,8 est acceptable, ce qui permet d'obtenir pour chaque segment un domaine de température ET souhaité. On peut comparer la température équivalente de la situation étudiée aux abaques établies d'après expérience.

On obtient une courbe qui permet de visualiser les segments situés en dehors de la fourchette acceptable. Ils seront inconfortables. La Figure 5 montre l'analyse de deux systèmes : on peut constater que le système provoque un inconfort chaud sur la poitrine et un inconfort froid sur le mollet et le pied droit.

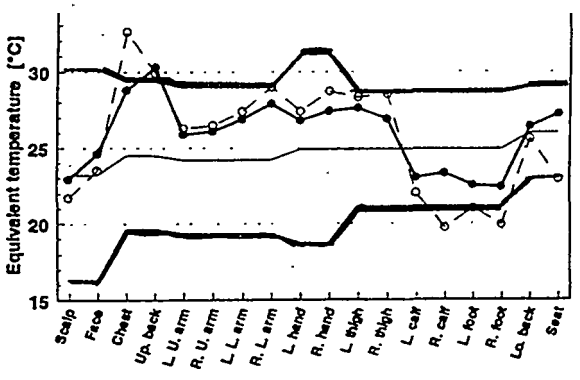


Figure 5 : Zones de températures équivalentes de neutralité [Bohm, 1997]
traits pleins épais : les limites de ET
trait fin : ET optimal
-o- et -•- : Valeurs de ET des situations étudiées

Cette méthode pose deux problèmes majeurs dans sa version actuelle. D'une part, les mesures de flux sont faites à l'aide d'un mannequin sec. Donc en climat chaud, l'effet de la transpiration n'est pas pris en compte. D'autre part, le mannequin étant régulé en température de façon isotherme, il ne pourra pas mettre en évidence l'inconfort local, car celui-ci apparaît justement lorsque les températures de peau varient. Les flux mesurés seront donc probablement très différents des flux réels.

* **Grandeurs physiologiques locales** : Actuellement, il est admis généralement que les risques d'inconfort, qui comportent une part de subjectivité sont liés aux sensations thermiques qui sont des données plus objectives. Ces dernières

sont elles-mêmes directement liées aux températures de peau et éventuellement à la mouillure cutanée [Galéou 1991, Candas 1995].

Herrmann et Candas [1995] proposent une expression qui permet de calculer le risque d'inconfort global en fonction des écarts de la température cutanée moyenne et de la température des grands segments corporels par rapport à une distribution de référence.

$$\text{Inconfort} = (\Delta T_{sk}.\ \Delta X_{MIT} + \Delta T_{segm}).\ \Sigma X_{MIT}.\ C$$

où : ΔT écart de température par rapport à la distribution de référence (sk - cutanée moyenne ; segm - 6 grands segments)

ΔX_{MIT} = $\Delta T_{mains} + \Delta T_{pieds} - \Delta T_{tête}$

ΣX_{MIT} = $|\Delta T_{mains}| + |\Delta T_{pieds}| + |\Delta T_{tête}|$

C facteur différent selon que l'on est en situation froide ou chaude et choisi de façon à ce que l'inconfort soit déclaré si la valeur trouvée dépasse 100 ; le risque d'inconfort sera faible si la valeur est inférieure à 90.

Ces travaux sont en cours de développement. La note finale correspond à un inconfort global, mais rend compte de l'hétérogénéité des grandeurs physiologiques.

3.2. Utilisation des modèles de thermorégulation

Comme nous l'avons souligné plus haut, le corps est un système complexe et régulé. Tant que l'on reste dans la zone de neutralité thermique, on peut faire abstraction des conséquences de la thermorégulation. Il est difficile de ne plus en tenir compte dès que l'on s'éloigne de cette zone, qui est en fait très étroite. Or, une infinité de combinaisons des divers paramètres d'ambiance peuvent procurer la même astreinte thermique. Il est impensable de toutes les cataloguer. Avec le développement des outils informatiques, il paraît évident que la solution la plus adaptée actuellement est l'utilisation de modèles de thermorégulation humaine.

Pour qu'un modèle de thermophysiologie soit utilisable et adaptable facilement à de nombreuses conditions environnementales, la physiologie humaine doit être représentée par un modèle de connaissance prenant en compte les phénomènes prépondérants et utilisant les paramètres susceptibles d'être modifiés par les conditions extérieures. Si la représentation des phénomènes physiologiques est suffisamment robuste pour tenir compte des changements d'environnement de l'homme, il suffit alors d'affiner la représentation de la partie purement thermique, c'est-à-dire le mode de calcul des échanges de masse et de chaleur au niveau de la peau. Ces améliorations passent par une bonne connaissance de toutes les spécificités de l'environnement à étudier.

La méthode d'analyse que nous présentons ici est basée sur un modèle de thermorégulation humaine multi-nœuds créé par des physiologistes. Le modèle initial possède 25 nœuds, le corps étant divisé en 6 segments. Ce modèle nous permet d'avoir accès à toutes les variables physiques et physiologiques représentant à tout instant l'état thermique global et local du corps humain [Thellier, 1989]. Pour les situations à étudier, le modèle de base a été modifié et comporte 25, 29 ou 33 nœuds, suivant le cas, pour tenir compte des différences droite-gauche et/ou avant-arrière [Monchoux, 1994 ; Althabégoïty, 1996 ; Piniec, 1997].

L'analyse des très nombreuses variables obtenues en sortie des modèles n'est pas facile pour un utilisateur, surtout s'il veut se servir du modèle pour reproduire et analyser des conditions réelles. Nous y avons donc adjoint des modèles purement physiologiques ou empiriques permettant de prévoir la façon dont l'homme perçoit son environnement thermique. Ces représentations dépendent évidemment des variables pertinentes pour la situation envisagée. Nous avons le plus possible utilisé uniquement le jugement sensoriel afin d'éviter la part de subjectivité qui est personnelle et difficile à représenter.

3.2.1 Les modèles dans l'habitat

Dans l'habitat, le modèle utilisé, MARCL (Modèle pour l'Analyse et la Recherche de Confort Local), comporte 25 nœuds (6 segments) [Thellier, 1989]. Nous y avons associé un module (TRIM) qui calcule les sensations thermiques locales sur une échelle en 7 points (Tableau 2) à partir des températures de peau locales ou des mouillures cutanées [Galéou, 1991], selon le type de vêtement et l'activité.

Les sensations peuvent être modifiées également par des conditions très hétérogènes (4 cas répertoriés) ; par exemple, si la tête est particulièrement chaude, la sensation globale sera augmentée d'un point.

Ce module fournit en plus des informations sur les valeurs des paramètres physiques citées plus haut risquant de provoquer un inconfort (1 = hors normes ; 0 = conforme aux normes).

-3 = froid		1 = légèrement chaud
-2 = frais	0 = neutre	2 = chaud
-1 = légèrement frais		3 = très chaud

Tableau 2 : Échelle de sensations thermiques locales et globale utilisée dans l'habitat

MARCL et TRIM sont des modules que l'on a placés dans l'environnement du logiciel TRNSYS. Ce code permet de modéliser l'ensemble des conditions thermiques avec la finesse que l'on désire et d'en déduire l'inconfort local en situation non homogène et instationnaire. Un exemple est présenté ; la Figure 6 en montre le type de résultats que l'on peut obtenir.

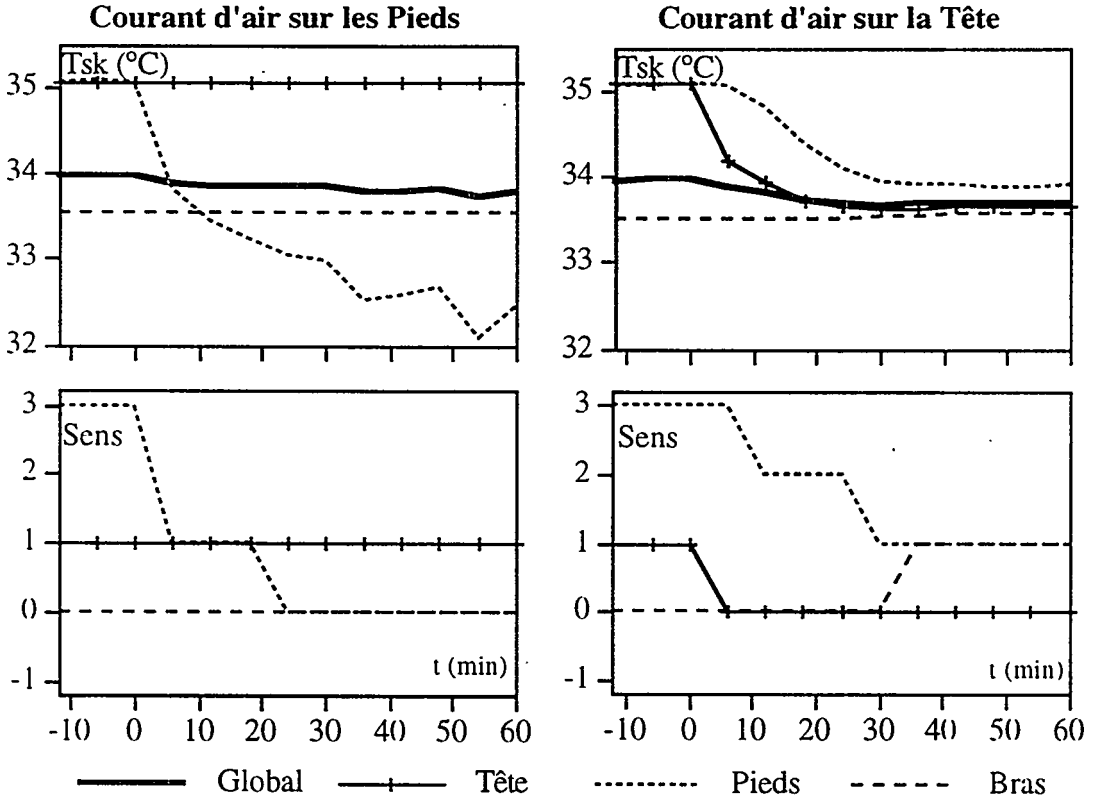


Figure 6 :Températures cutanées locales et sensations locales provoquées par un courant d'air froid sur la tête ou sur les pieds

Un individu est nu dans une ambiance stable et homogène (Top = 28°C, Vair = 0,1m/s). A partir de l'instant 0, un courant d'air frais (Tair = 25°C, et Vair = 1m/s) est appliqué soit sur les pieds, soit sur la tête. Dans les deux cas, le bilan thermique global est identique, car pieds et tête ont des surfaces d'échange voisines. La sensation globale reste constante, mais des différences apparaissent suivant la localisation du courant d'air :

- le courant d'air sur les pieds engendre un forte baisse de la température des pieds, ce qui occasionne une baisse de 3 points de la sensation thermique des pieds et aucune modification sur les autres segments ;

- lorsque le courant d'air est dirigé sur la tête, presque toutes les températures baissent ; la tête tout d'abord, puis essentiellement les mains et les pieds. Ceci est un exemple des conséquences des réactions de thermorégulation. Dans ce cas, il y a un début de lutte contre le froid et donc réduction du débit sanguin dans les extrémités. La baisse des températures cutanées entraîne évidement une baisse des sensations thermiques de ces segments.

3.2.2. Les modèles dans les véhicules

Une étude a été menée en collaboration avec P.S.A. PEUGEOT-CITROËN et Valéo Thermique Habitacle, pour développer MATHER (modèle de MAnnequin THERmique dans un véhicule), le but étant de remplacer les essayeurs habituels utilisés pour tester les systèmes de chauffage et de climatisation par un modèle donnant les mêmes informations.

MATHER comporte 29 nœuds (7 segments) pour tenir compte des fortes asymétries gauche-droite. Il calcule un jugement thermique sur l'échelle de cotation thermosensorielle de P.S.A. en 9 points (Tableau 3). Cette échelle comporte une part de subjectivité. Au cours des essais, les jugements thermiques locaux et le jugement global déclarés par le conducteur sont enregistrés en continu à l'aide d'une "boite à sensation" développée au LESETH. Une autre version du modèle comporte 33 nœuds pour tenir compte également des différences avant-arrière dues au siège [Althabégoïty 1996].

1 = très froid	4 = confortablement frais	7 = chaud
2 = froid	5 = confort	8 = très chaud
3 = frais	6 = confortablement chaud	

Tableau 3 : Échelle de jugement thermosensoriel utilisée dans les voitures

La Figure 7 donne un exemple pour la comparaison de résultats expérimentaux avec ceux que l'on peut obtenir à l'aide de MATHER [Piniec, 1997].

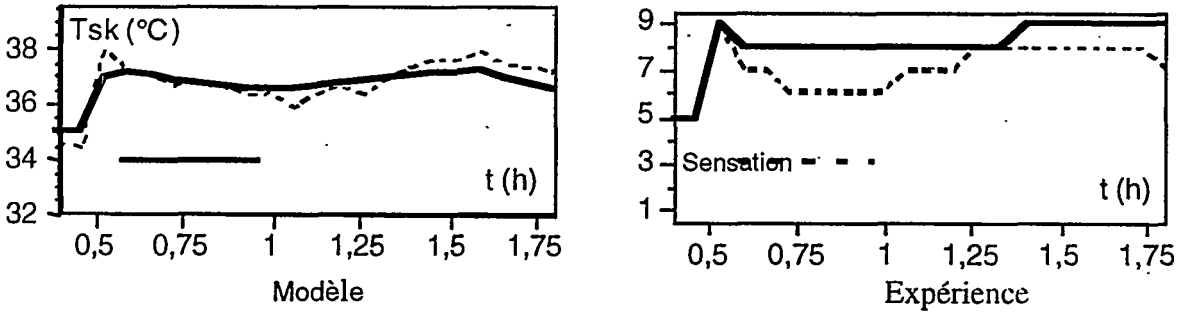


Figure 7 : Température cutanée de la tête et jugement thermosensoriel local

Dans l'analyse des situations, il faut tenir compte du fait qu'en cours de conduite l'homme ne peut pas modifier son activité pour se réchauffer s'il a froid, ni modifier sa tenue vestimentaire. La sensation de froid ou de chaud qu'il éprouve l'amènera donc à agir uniquement sur le système de régulation de la ventilation.

Il faut noter également que l'un des avantages du modèle est d'avoir accès à des variables telles que les flux de chaleur locaux, qui sont des données difficilement mesurables lors des expériences (Fig. 8) mais très utiles pour comprendre la cause de l'inconfort et déterminer la façon d'y remédier.

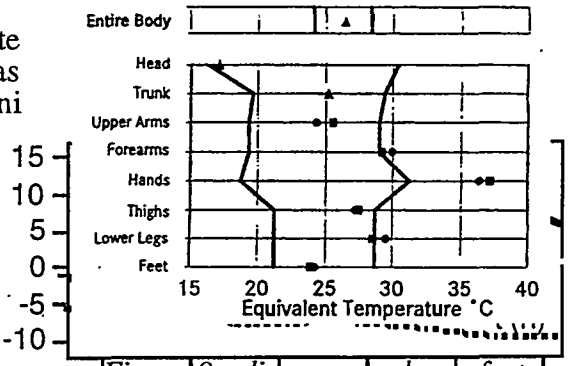


Figure 9 : diagramme de confort
traits pleins : limites optimales
s valeurs calculées (• gauche, n droite)

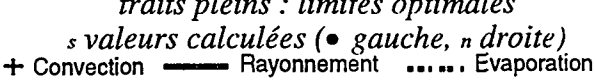


Fig. 8 : Flux de chaleur échangé par la tête

D'autres équipes utilisent des modèles de thermorégulation humaine dans un véhicule. Le modèle de Maué [1997] possède 14 segments et permet de calculer les températures équivalentes locales. Celles-ci sont ensuite comparées à des valeurs limites qui procurent le confort à 80% des personnes (Fig. 9). Il semble que cette méthode ne soit utilisée qu'en régime stationnaire.

4. Conclusions

Pour un concepteur de systèmes de chauffage et de climatisation, procurer des conditions optimales aux utilisateurs doit être une des préoccupations principales. Il doit par conséquent posséder des outils permettant d'évaluer rapidement les conséquences sur le confort des solutions techniques qu'il a choisies.

Les données existantes dans les normes ne sont actuellement pas suffisantes pour aborder les problèmes d'inconfort local, souvent présents dans l'habitat, car elles se limitent à quelques données physiques. Les méthodes développées dans d'autres situations plus contraignantes pourraient être alors adaptées à l'habitat.

Pour évaluer l'inconfort, il faut tenir compte de l'être humain et de ses réactions physiologiques, mais pour un utilisateur non averti, la description de l'état thermique du corps est plus compréhensible en termes de sensation thermique ("j'ai froid", "j'ai chaud") plutôt que de température cutanée. Il faut donc pouvoir passer directement des données physiques de l'ambiance aux jugements sensoriels qu'elles engendrent. Le corps humain a un comportement thermique complexe difficile à prévoir. Un modèle de thermorégulation souple mais suffisamment complet peut simuler ce comportement et il peut être adapté à des utilisations multiples. Il est alors indispensable d'avoir une représentation fine des conditions climatiques. Cette représentation, peut être donnée par une série de mesures pour les systèmes existants, ou par des résultats de calcul donnés par tout type de modèle du bâtiment lorsqu'il s'agit de la phase de développement d'un projet. Les modèles sont relativement simples d'utilisation et permettent d'aborder les problèmes d'inconfort local en situation hétérogène et en régime instationnaire

RÉFÉRENCES

ALTHABÉGOÏTY F. - 1996. *Échanges thermiques de l'homme dans un environnement fortement hétérogène. Cas de la voiture.* Thèse de l'Université Paul Sabatier n°2387.

BOHM M., NORÉN, HOLMÉR I., NILSSON H. - 1997. *Special glazing to improve the thermal climate in cabs.* Proc. 4th A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp. 163-172.

CANDAS V., HERMANN C. - 1995. *Les bases physiologiques de l'inconfort.* Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 111-121. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B.

DESSAGNE J.M. - 1985. *Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique. le profil de confort UCRES.* Proc Clima 2000, Copenhague.

GALÉOU M. - 1991. *La sensation thermique de l'homme dans son habitat : des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations.* Thèse de l'Université Paul Sabatier n°1008.

HERRMANN C., BOTHOREL B., CANDAS V. - 1995. *Inconfort thermique et ambiances hétérogènes.* Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 555-559. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B.

HOLMER I., NILSSON.H., NORÉN O. - 1995. *Thermal aspects of vehicle comfort.* Proc. 3rd A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp.392-400.

LIN C.H., HAN T., KOROMISLAS C.C. - 1992. *Effects of HVAC design parameters on passenger thermal comfort.* Proc. International congress & exposition of the S.A.E. Detroit-USA, SAE Technical papers series n° 92 0264.

MAUÉ J., WAHL D., CURRIE J. - 1997. *Computation of the thermal environment in passenger compartement and evaluation of thermal comfort.* Proc.4th A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp. 147-155.

MONCHOUX F., THELLIER F., BAGIANA F., BARER A. - 1994. *Human physiological model during Extra Vehicular Activity.* Proc. 24th Inter. Conf. on Environmental Systems SAE N° 941333. Friedrichshafen-Germany.

NORMES ISO 7726-1985 (F). *Ambiances thermiques - Appareils et méthodes de mesure des grandeurs physiques.* Ed. AFNOR.

NORMES ISO 7730-1985 (F). *Ambiances thermiques modérés, détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique.* Ed. AFNOR.

OLESEN B. - 1985. *Local Thermal Discomfort.* Technical review, Brüel & Kjær.

PARSONS K.C. 1993. *Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environement on human health, comfort and performance.* Eds. Taylor & Francis

PINIEC S., THELLIER F., DUVEAU H., DEFFIEUX J.C. - 1997. *MATHER - Model of local thermal sensations of a car driver.* Proc. 4th A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp.109-118. SAE Technical paper n° 97A3014.

THELLIER F. - 1989. *Modélisation du comportement thermique de l'homme dans son habitat : une approche de l'étude du confort.* Thèse de l'Université Paul Sabatier n°510.

THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F. - 1994. *Simulation of an occupied building for the analysis of thermal comfort requirements.* Ergonomics Vol. 37, n°5, pp.817-825.

VERS UNE APPROCHE GLOBALE DE LA CLIMATISATION DES BATIMENTS

P. DEPECKER*, G. ACHARD **

* Professeur Université Cl. Bernard Lyon 1, Centre de Thermique de Lyon, Equipe Thermique du Bâtiment (CETHIL-ETB), UPRES A CNRS 5008

** Professeur Université de Savoie, Laboratoire de Génie Civil et Habitat (LGCH) ESIGEC, Chambéry.

RESUME

Ce texte tente de donner un éclairage complémentaire du problème général de la climatisation des bâtiments des secteurs résidentiels et tertiaires. Les questions sont abordées sous la double préoccupation des contraintes de confort d'ambiance et de dépense énergétique. Le développement des systèmes de climatisation étant aujourd'hui considéré comme fatal, on se pose le problème de la minimisation des coûts énergétiques: si la climatisation se révèle nécessaire, autant l'exploiter dans les meilleures conditions, ce qui permet de mieux l'accepter, dans un contexte de recherche d'économie d'énergie.

La première partie du texte introduit la problématique dans sa globalité, en montrant que la question des ambiances physiques, à l'intérieur des bâtiments, est fondée sur quatre composantes (thermique, lumière, acoustique, aéraulique) dont les couplages ne peuvent plus être ignorés. L'accent est mis sur la climatisation en saison chaude, période pendant laquelle les consommations d'énergie risquent d'augmenter considérablement dans les prochaines décennies.

La deuxième partie met en évidence la nécessité d'aborder le problème général en termes de consommations d'énergie effective, et non en termes de besoin, comme les outils généraux de prédiction du comportement thermique des bâtiments l'on fait jusqu'à ces dernières années.

La troisième partie est consacrée à un exemple de traitement du couplage Eclairage-Thermique, au travers des inter-actions qualitatives et quantitatives, exploitant des travaux récents développés dans le cadre d'une thèse. On montre ainsi comment on peut étudier simultanément l'éblouissement produit par une baie vitrée (aspects éclairage naturel) et le confort thermique en période estivale (aspects thermique). Cette approche conduit à la détermination du profil de variation temporelle de la transparence de la baie, induisant une technologie d'occultation variable.

Chapitre I - Introduction générale

Nous entrons probablement dans une période de développement sans précédent de la climatisation artificielle des bâtiments des secteurs tertiaires et résidentiels. Parmi les raisons de cet essor, on peut principalement citer l'émergence d'un besoin bien identifié de l'amélioration de la qualité des ambiances pendant la saison chaude (aspects thermique et acoustique), répondant à un déficit de la qualité de la conception architecturale. Même si cette saison est relativement courte en France métropolitaine, les difficultés générées dans les locaux de travail ou les espaces de vie dues aux surchauffes des ambiances thermiques se traduisent par une demande de plus en plus forte de rafraîchissement des bâtiments, améliorant les conditions de travail ou simplement le confort d'habitation.

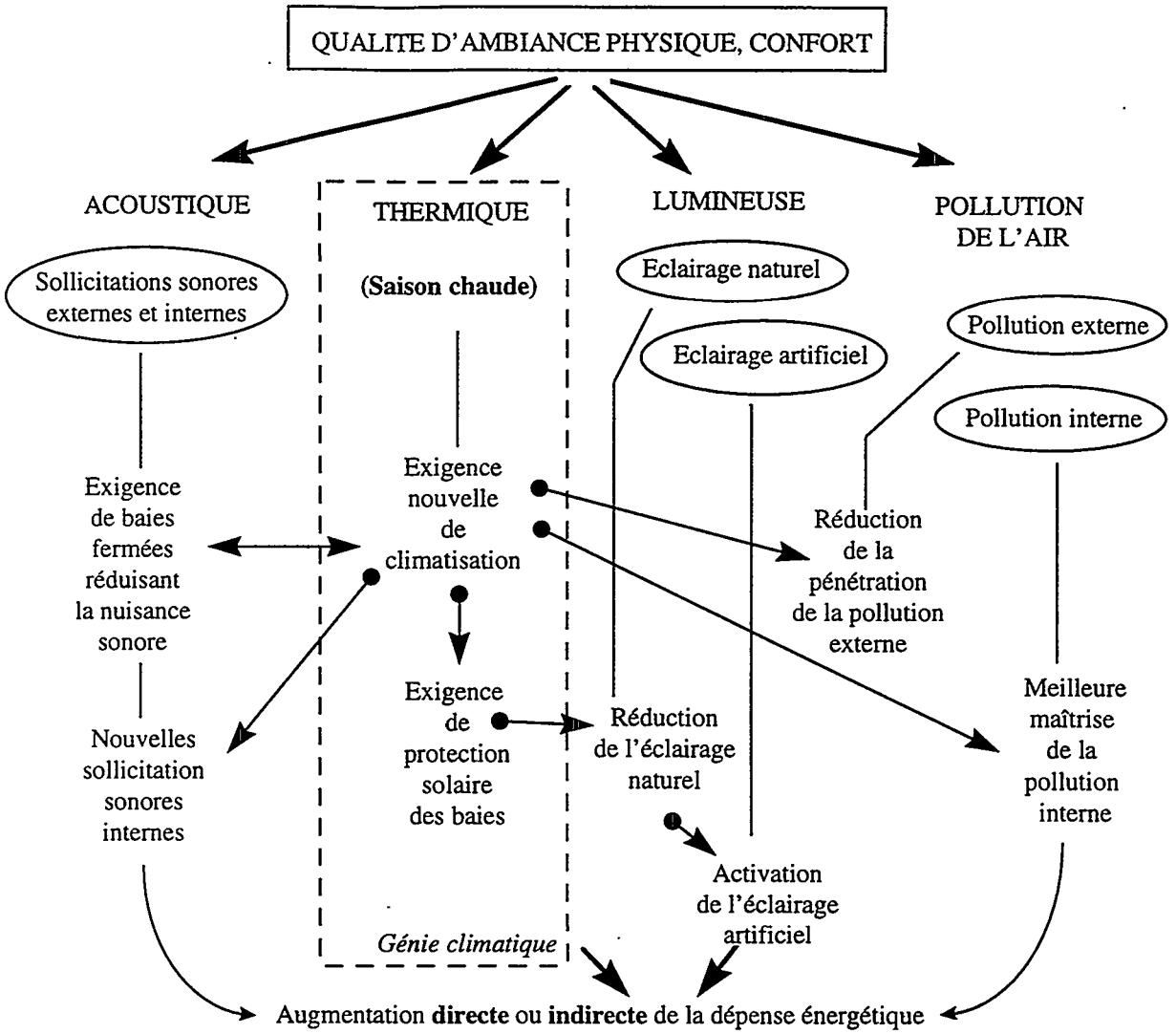


Fig 1. Représentation du couplage des questions liées à la climatisation d'été.
Les flèches représentent les effets inducteurs plus ou moins importants

Or, le développement des systèmes de climatisation, dont on peut penser qu'il sera durable, est aussi générateur de consommations supplémentaires d'énergie, notamment électrique. Cette tendance contrarie les efforts menés pendant les deux dernières décennies sur les économies d'énergie dans les secteurs résidentiels et tertiaire. Il nous paraît donc important, devant ce constat de développement inéluctable, de réfléchir à une approche globale du problème de la consommation énergétique et du confort dans les bâtiments. Le texte que nous proposons a pour but de définir une stratégie globale de recherche, en couplant les différents problèmes d'ambiance suscitant la dépense énergétique sous la contrainte de l'amélioration des conditions de confort des usagers. D'une certaine manière, il s'agit d'induire une dynamique de recherche considérant le bâtiment comme un objet complexe et interactif, préfigurant l'habitat de l'an 2000, en exploitant les connaissances avancées sur le comportement thermique de l'enveloppe et des systèmes, associées à celles concernant l'éclairage naturel et artificiel, mais aussi l'acoustique des locaux.

Le point d'ancrage de notre problématique est le concept de confort d'ambiance. Nous partons du principe selon lequel une ambiance physique se définit au travers de 4 composantes principales :

- composante de qualité thermique
- composante de qualité lumineuse
- composante de qualité acoustique
- composante de qualité de l'air.

Ces quatre composantes peuvent aujourd'hui être correctement qualifiées à l'aide d'indices. Nous avons conscience que ces indices demeurent des identificateurs imparfaits de la notion de confort global. Toutefois, compte tenu de nos objectifs et de l'absence de connaissances avancées sur la

perception globale du confort d'usage, nous nous proposons de dessiner un projet permettant d'optimiser les paramètres du projet sous la double contrainte de la minimisation de la consommation énergétique et de la maximalisation des indices de confort (fig 1)

Cette préoccupation est très étroitement liée à celles, plus spécifiques, du génie climatique par les aspects que nous venons d'évoquer plus haut et concernant plus particulièrement la future augmentation de consommation d'énergie des systèmes de production de froid.

Nous nous attachons donc à établir un schéma général d'action de recherche visant à démontrer le nécessaire assemblage des connaissances acquises dans les différents domaines, en exhibant les secteurs où un effort de développement devient indispensable. En particulier sur des couplages de systèmes permettant non seulement un fonctionnement plus adapté aux attentes des usagers, mais aussi en limitant la dépense énergétique et les effets de pollution très préoccupants de ces dernières années. Notre démarche s'inscrit donc dans le cadre du développement durable et de celui, plus restreint, du bâtiment à haute qualité environnementale.

Chapitre II - Caractérisation des bâtiments et des systèmes associés: identification de la dépense énergétique effective.

Au cours des deux dernières décennies, l'effort de la communauté scientifique s'est porté sur la modélisation des bâtiments et de leurs systèmes afin de mettre au point des outils de prédiction d'aide au projet. Ces travaux ont permis un important progrès des connaissances sur le sujet, qu'il s'agisse du confort dans les locaux, de la conception des parois structurant le bâtiment, et de certains systèmes comme les émetteurs de chaleur, les sources de lumières ou les systèmes de ventilation.

La difficulté que nous rencontrons aujourd'hui est principalement liée au fait que la modélisation, dans sa première mission de prédiction, s'est souvent limitée à la détermination de besoins énergétiques. Certains systèmes ont parfois été modélisés dans le but d'atteindre les consommations d'énergie effectives, mais ces cas sont rares.

II.1 - Besoin énergétique et consommation énergétique.

Ces deux notions sont bien connues des thermiciens, et en particulier des praticiens. C'est, par ailleurs, une nuance bien exhibée dans les textes de calcul thermique règlementaire des ouvrages, pour la saison froide, en application depuis le début des années 70.

Pour certains de ces systèmes, et en particulier ceux de la thermique, la plupart des codes de calcul prédictifs simulent leur comportement en régime stationnaire ou instationnaire sans faire appel aux notions de rendement énergétique et de vieillissement (encrassement, régulation, chute de performance d'origines diverses ...). Par exemple, dans le cas de la simulation thermique d'un bâtiment, lorsque l'on évalue la charge thermique, en été ou en hiver, on suppose souvent que le système de chauffage ou de refroidissement procure une réponse parfaite, de type convective, pour maintenir le ou les températures de consigne. Cette simplification permet d'éviter de simuler finement le comportement des systèmes produisant cette réponse thermique, en découplant les transferts radiatifs et convectifs.

Dans le cas du rafraîchissement de la saison chaude, la charge thermique est supposée exactement compensée par l'injection d'air frais dans les locaux. Dans ce cas particulier, on peut légitimement admettre, du strict point du vue du transfert de chaleur, que la représentation du système technologique est correcte, la simplification se situant alors dans l'hypothèse de l'homogénéité de l'air dans l'ensemble du volume. Par contre, la connaissance de l'énergie effectivement consommée par le groupe de production de froid est rarement accessible comme résultat in fine de la simulation. Or, pendant la saison chaude, nous devons considérer que cette consommation d'énergie constitue la deuxième contrainte (avec le confort) agissant sur le processus d'optimisation (fig2). Dans la suite du texte, nous montrons comment des travaux récents [LAF97a] traitent du couplage Eclairage/Thermique. Ces travaux ont été menés, en ce qui concerne l'énergie

consommée, sur la base de la contrainte "réduite" du besoin énergétique. Nous proposons, dans le cadre des recherches à développer ultérieurement, de les affiner en intégrant la notion de consommation énergétique effective, prenant en compte les caractéristiques des machines: rendements, efficacité des échangeurs, coefficient de performance, ...(fig 2).

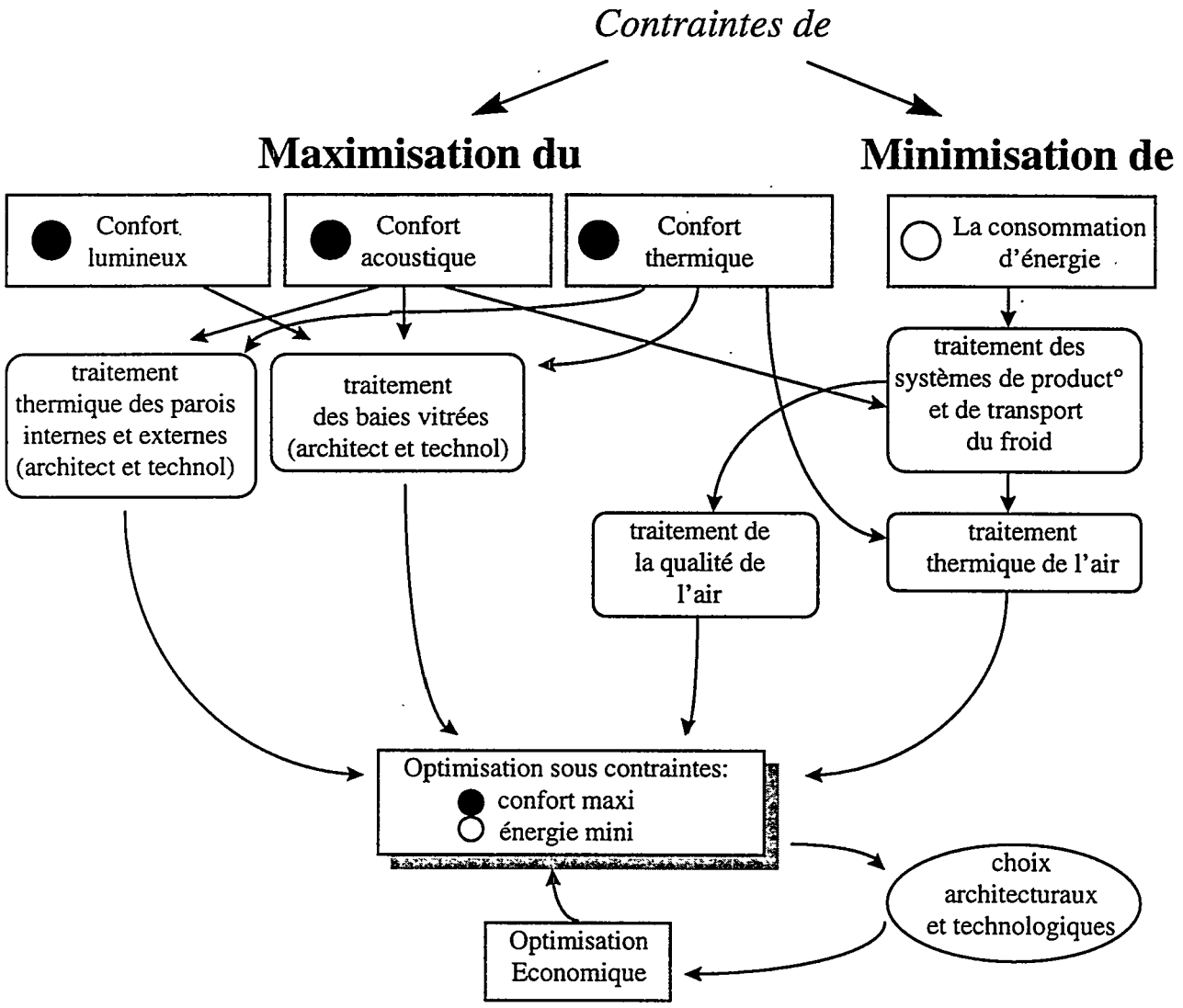


Fig 2. Principe général du processus d'optimisation pendant la saison chaude.

II.2 - Vers une amélioration des outils de calcul prédictifs.

Les travaux de modélisation que nous nous proposons de développer s'appuient sur tous les acquis de la recherche accumulés au cours des deux dernières decennies. Les utilisateurs visés sont, dans un premier temps les ingénieurs des bureaux d'études. Le but serait en effet de produire des instruments capables de fournir l'information *in fine* de performance du bâtiment, c'est-à-dire celles qui concernent directement l'usager: le confort et son coût induit. Au-delà de cette stricte information, les outils élaborés devraient être capable de permettre des itérations techniques et économiques dans le cadre d'un processus d'optimisation. Nous pensons en effet qu'il est probablement difficile sinon impossible d'envisager une optimisation automatique de conception de l'ensemble Bâtiment + Systèmes, compte tenu de l'extrême *variété* et *complexité* des projets. Nous croyons plus à une optimisation pilotée par l'ingénieur, en connaissance du contexte technologique et économique, mais aussi de l'ensemble des détails techniques impossibles à intégrer dans les codes de calcul. Partant de ce principe, nous nous proposons de mettre l'accent sur un outil technique efficace permettant, dans un premier temps, de coupler les principales contraintes et ayant une incidence sur le *vécu énergétique* du bâtiment. Dans une telle approche, et en faisant porter l'effort sur la *saison chaude*, il apparaît qu'un effort de modélisation soit à développer sur le

fonctionnement des systèmes de production et de transport du froid (fig 3), ainsi que sur le couplage des systèmes thermique et d'éclairage, principaux consommateurs d'énergie sous les contraintes de confort d'ambiance. Cette stratégie de recherche est compatible avec les travaux réalisés ces dernières années sur la qualité de l'air, puisque le traitement des systèmes de transport du froid induit une réflexion sur la ventilation (en supposant, bien sûr, que le vecteur caloporteur est l'air soufflé dans les ambiances).

Le deuxième public concerné par la mise au point de tels outils est celui des architectes, et des donneurs d'ordre en général. Les outils que nous projetons seraient plus riches que ceux qui existent actuellement, puisqu'ils intégreraient les systèmes. Nous avons conscience que ces instruments sont, dans leur état actuel (prédisant l'information sur le besoin énergétique), assez difficiles à utiliser en raison, en particulier, de l'absence d'interface graphique. Toutefois, *l'exploitation* intensive de ces codes de calcul *par le secteur de la recherche scientifique* est susceptible de *produire des éléments de connaissance experte* fort utiles aux concepteurs en phase d'avant projet. Nous faisons ici référence aux études de sensibilité qu'il serait utile de mener sur des bâtiments de référence, représentatifs des tendances de l'architecture contemporaine (surfaces vitrées importantes, technologies de traitement des baies vitrées, introduction des systèmes de production du froid dans le secteur résidentiel, ...). Même si, comme nous venons de le souligner plus haut, la singularité des projets gêne la mise au point d'un processus général d'optimisation, on peut, en revanche, envisager la production de connaissances sur des grandes catégories de bâtiments associés à des systèmes technologiques particuliers comme ceux de l'aéraulique (fig 3).

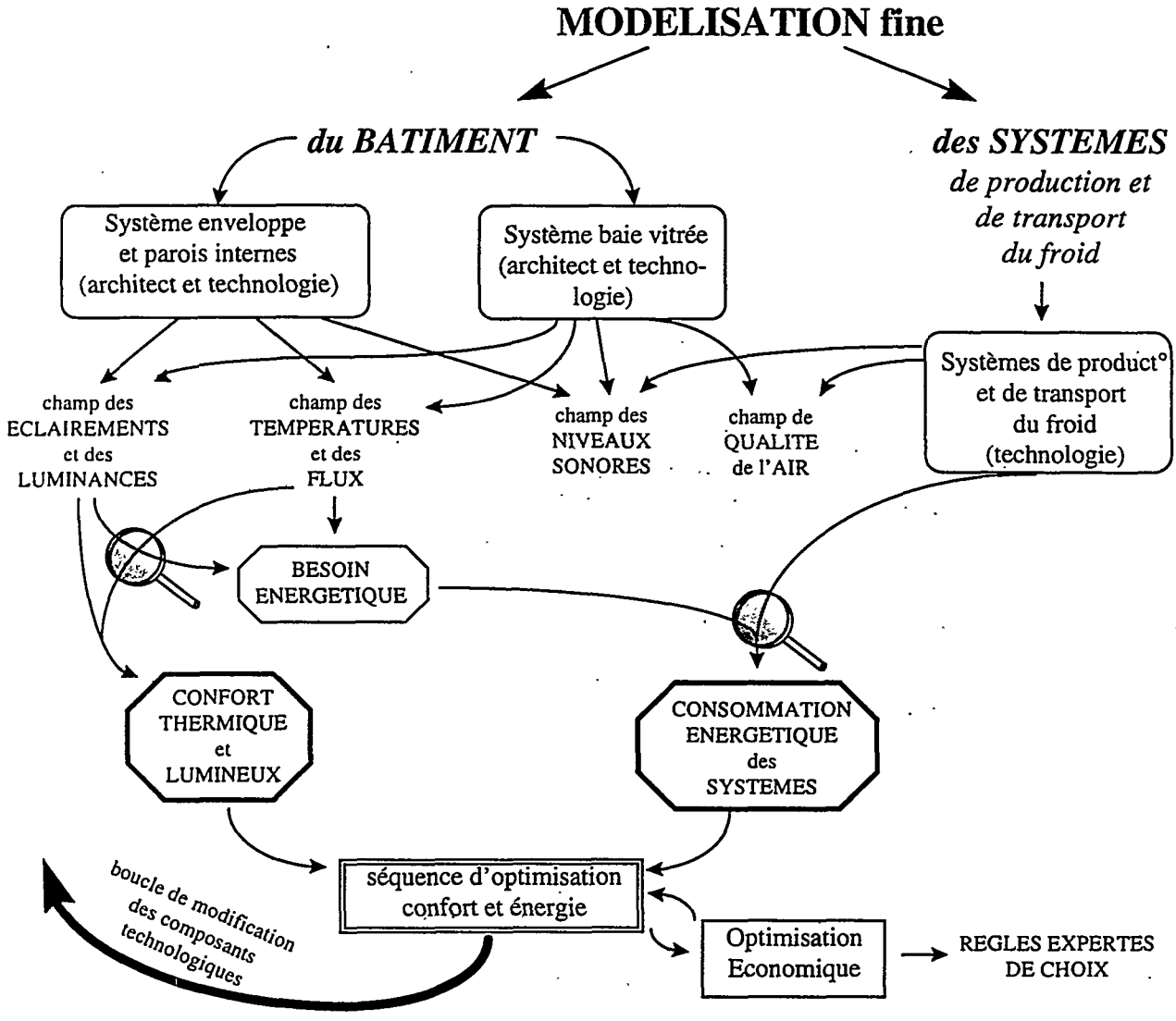


Fig 3. Organisation générale du processus de modélisation pour l'élaboration d'un code permettant l'optimisation. *Sur ce schéma, l'optimisation agit seulement sur le couplage thermique-éclairage.*

Chapitre III - Un exemple d'intégration : le couplage "Eclairage/thermique"

III.1- Introduction

Dans le secteur tertiaire, une grande part des consommations d'électricité des bâtiments est due à l'éclairage artificiel. Il participe aussi aux charges thermiques et a, de ce fait , un impact non négligeable sur les besoins et les consommations des systèmes de chauffage (influence positive) et des systèmes de refroidissement (influence négative).
Des solutions architecturales intégrant mieux la lumière naturelle et l'utilisation de systèmes de contrôle lumineux efficaces pourraient permettre des économies substantielles d'électricité par une meilleure utilisation de la ressource naturelle correspondant à l'éclairage naturel. Cependant, ce dernier s'accompagne d'apports calorifiques variables plus ou moins recherchés suivant les périodes et les exigences au niveau du confort thermique. Il est aussi à l'origine de situations inconfortables sur le plan visuel (éblouissement dû au soleil ou à la voûte céleste) qui peuvent être évitées par une modulation, au fil des saisons, de la lumière naturelle - action automatique ou/et au gré des occupants sur des protections solaires adaptées.
Ces observations font apparaître :

- une complémentarité entre éclairage naturel et éclairage artificiel qui est une source potentielle d'économie d'électricité et qui doit garantir une ambiance lumineuse de qualité;
- un couplage "Eclairage/Thermique" dont les contributions, tant au niveau des consommations énergétiques qu'au niveau du confort visuel et thermique, sont variables et parfois antagonistes suivant les saisons.

Dans l'un et l'autre cas, des études paramétriques sont nécessaires pour repérer les situations les plus intéressantes et les paramètres caractéristiques du couplage. Ces informations sont en effet nécessaires pour dimensionner les installations d'éclairage (artificiel et naturel) et les installations de conditionnement climatique (chauffage et refroidissement), pour définir les lois de commande de la gestion des apports lumineux et pour prévoir les consommations énergétiques.

III 2- Analyse qualitative des interactions entre l'Eclairage et la Thermique

Les interactions étudiées concernent les consommations énergétiques de l'ensemble des systèmes énergétiques impliqués dans le couplage "Eclairage/Thermique" et l'aspect visuel et thermique du confort global dans les locaux tertiaires.
La variable la plus influente et la plus générique est l'ouverture solaire qui est le rapport de la surface de captation lumineuse (ou solaire) effective sur la surface de plancher. En effet, nous pouvons lister un certain nombre de tendances dépendant directement de cette variable :

- la consommation d'électricité du système d'éclairage artificiel diminue lorsque l'ouverture solaire augmente jusqu'à une valeur asymptotique qui correspond à une limite fonction de la profondeur du local et de l'amplitude de réglage du système d'éclairage artificiel. La diminution est d'autant plus importante que l'installation d'éclairage artificiel est moins performante;
- pour une petite ouverture solaire, le système de refroidissement doit compenser la charge thermique associée au système d'éclairage artificiel assurant le complément de lumière. A l'opposé, on doit observer une diminution de la consommation énergétique du système de refroidissement lorsque l'ouverture solaire augmente. Cependant, pour de grandes valeurs d'ouverture solaire, le gain précédent est souvent largement contrebalancé par l'augmentation des charges thermiques dues à l'ensoleillement pénétrant à l'intérieur des locaux. Il existe donc une valeur d'ouverture solaire qui rend minimale la consommation du système de refroidissement;
- la consommation énergétique du système de chauffage augmente, quant à elle, lorsque l'ouverture solaire augmente en raison de l'augmentation des déperditions de chaleur à travers les surfaces vitrées et de la réduction des charges thermiques de l'éclairage artificiel

de complément (élément négatif dans ce cas). Cette tendance à l'augmentation doit certainement se stabiliser (voire s'inverser dans certaines situations favorables) en raison de l'effet bénéfique des apports solaires sur les charges de chauffage.

En résultats cumulés sur une période annuelle, il est possible qu'une valeur d'ouverture solaire conduise à un minimum de consommations énergétiques globales, compte tenu des tendances antagonistes décrites précédemment.
Notons que l'amplitude de variation de l'ouverture solaire est forcément limitée, non seulement par des considérations énergétiques évidentes, mais aussi par les critères de confort visuel (absence d'éblouissement) et de confort thermique (absence de surchauffes) qui sont à la base du contrôle de la transparence des systèmes "fenêtre".

Outre l'ouverture solaire, les autres paramètres influents du couplage "Eclairage/Thermique" sont :

- le scénario de commande de l'éclairage artificiel (gradation ou non de la lumière artificielle, zonage ou non de l'installation d'éclairage artificiel, prise en compte ou non du risque d'éblouissement dû à la lumière naturelle);
- l'inertie thermique interne des locaux, c'est à dire celle qui intervient sur la transformation des échanges radiatifs, de courtes et grandes longueurs d'onde, en flux convectifs, après absorption par les parties internes des éléments d'enveloppe;
- les propriétés optiques et thermiques des composants "fenêtre". En effet, la transparence et la conductance thermique du système "fenêtre" jouent un rôle fondamental dans l'étude du couplage "Eclairage/Thermique". Il en est de même de son mode de gestion qui peut mettre en oeuvre divers systèmes passifs (pare soleil fixe, verre thermochrome, isolation transparente,...) ou/et des systèmes actifs plus ou moins faciles à contrôler (systèmes d'occultation mobiles, stores, verres electrochromes,...).

La recherche des situations favorables est par conséquent assez difficile et justifie le recours à un outil informatique dont l'architecture générale est décrite sur le schéma de la figure 3.

Pour illustrer l'intérêt que présente l'analyse, même partielle, du couplage "Eclairage /Thermique", nous allons présenter succinctement les résultats d'une étude portant sur la possibilité de limiter les surchauffes dans les locaux tertiaires en contrôlant la transparence de leurs baies vitrées, uniquement à partir d'un critère visuel permettant de limiter les risques d'éblouissement dus à la lumière naturelle.

III 3- Etude des risques d'inconfort visuel et thermique dus aux sollicitations solaires.

III 3.1- Modélisation du comportement lumineux et thermique des locaux.
Les sollicitations solaires directes et diffuses présentent à la fois un caractère énergétique (rayonnement énergétique de courtes longueurs d'onde) et un caractère lumineux ou visuel (éclairage naturel). Les données météorologiques énergétiques sur les sollicitations solaires sont abondantes alors que les données lumineuses sont presque inexistantes. Nous avons donc utilisé un modèle d'efficacité lumineuse de type modèle de PEREZ [PER 90] (modèle "K_L" de la figure 4) permettant de passer des unes vers les autres. Les calculs des éclairements lumineux produits par les baies vitrées ont été réalisés avec le logiciel d'éclairage GENELUX [MIT96] qui permet de modéliser le comportement lumineux des locaux quel que soit le type d'éclairage utilisé (modèle "G_L" de la figure 4). Nous l'avons complété pour étudier le risque d'éblouissement inconfortable provoqué par la vision directe de la voûte céleste ou du soleil à travers les baies vitrées. En effet, l'éblouissement inconfortable dû à des sources de grandes dimensions, telles que des baies vitrées, peut être évalué par la formule suivante [CHA83] donnant l'indice d'éblouissement G dit "de Cornell" :

$$G = 10\log_{10}\left[\frac{1}{L_b + 0{,}07\Omega_w^{0,5}.L_w}\cdot\sum_{i=1}^{m} L_i^{1,6}.\frac{\omega_i^{0,8}}{p_i^{1,6}}\cdot\right]$$

avec :

m : nombre de sources élémentaires éblouissantes présentes dans le champ visuel d'un observateur (résultant d'une discrétisation de la baie vitrée);
L_i : luminance de la source élémentaire i [en $cd.m^{-2}$];
ω_i : angle solide sous-tendu par la source élémentaire i, depuis l'oeil d'un observateur;
p_i : indice de position de GUTH [LUC49] relatif à la source élémentaire i , et qui prend en compte la variation de la réaction de l'oeil en fonction de la position de l'image de la source sur la rétine;
L_b : luminance d'adaptation de l'oeil [en $cd.m^{-2}$] qui caractérise l'état de l'oeil d'un observateur avant un éventuel éblouissement provoqué par des sources de luminance beaucoup plus élevée;
Ω_w : angle solide sous-tendu par la baie vitrée, depuis l'oeil d'un observateur;
L_w : luminance moyenne de la baie (= source éblouissante) [en $cd.m^{-2}$].

Une échelle de perception de l'éblouissement inconfortable provoqué par des baies vitrées est associée aux valeurs de l'indice de Cornell G, comme l'indique le tableau suivant :

Perception de l'éblouissement	Indice d'éblouissement de Cornell : **G**
juste imperceptible	16
juste acceptable	20
juste inconfortable	24
juste intolérable	28

Nous supposons qu'une valeur de l'indice de Cornell supérieure à 24 correspond à un risque certain d'inconfort visuel par éblouissement.

Quant à l'étude du comportement thermique des locaux, nous l'avons réalisée en utilisant une version adaptée du logiciel TRNSYS qui, en raison de sa structure modulaire, convient parfaitement bien à ce genre d'étude de phénomènes couplés (modèle "Th" de la figure 4). Les risques d'inconfort thermique dues aux surchauffes provoquées, en été, par l'ensoleillement sont étudiés par l'intermédiaire de l'indice normalisé PMV [ISO93] ou de la température opérative qui est assez bien corrélée avec le PMV [OLE87]

III 3.2- Résultats

Nous avons effectué une simulation du comportement lumineux et thermique d'un bureau de grandes dimensions (9 x 6 x 3 m^3), implanté à Mâcon, pendant la période estivale (mois de juin). Comme le bureau testé n'était pas climatisé, seule l'influence du couplage "Eclairage/Thermique" sur les composantes visuelle et thermique du confort global a été étudiée. La surface vitrée occupe, de manière centrée, 55% de la façade Sud (6 x 3 m^2) et est largement dimensionnée pour assurer, en période estivale, les apports de lumière naturelle permettant d'obtenir les niveaux d'éclairements lumineux nécessaires pour effectuer des activités de bureau. La classe d'inertie thermique interne du local est "forte".

D'une manière générale, les risques d'éblouissement sont plus fréquents que les risques de surchauffe et l'inconfort visuel anticipe toujours l'inconfort thermique - les phénomènes lumineux n'étant pas affectés d'inertie.

Ce constat nous a incité à étudier si on pouvait améliorer le confort thermique estival en modifiant la transparence des baies vitrées à partir d'un seul critère visuel: limiter les risques d'éblouissement. En effet, éblouissement et surchauffe ont la même cause mais n'interviennent pas en même temps, en raison de l'inertie thermique qui retarde les effets thermiques par rapport aux sollicitations. Nous avons donc calculé le profil de variation temporelle de la transparence de la baie vitrée qui permet d'éviter l'éblouissement inconfortable ($G < 24$) à tout instant de la journée pour six observateurs de référence. Ils sont placés dans le local, face à la baie, suivant deux lignes transversales distantes de 2

et 4,5 m par rapport au mur de façade - leur position respective correspondant à l'axe et aux bords droit et gauche de la baie.
Le profil correspond à la courbe du facteur "a" de la figure 5, qui représente le pourcentage de réduction du facteur de transmission de la baie que doit apporter un système d'occultation réglable. En d'autres termes, la courbe précédente correspond aussi à la loi de commande de la régulation d'un système d'occultation, pour éviter l'éblouissement.
Les facteurs de transmission énergétiques de la baie ont donc été modifiés en conséquence avant de simuler sur la même période le comportement thermique du local en évolution libre de température [LAF97a]. Nous avons reporté sur la figure 5 la température d'air Ta et la température résultante Tr du local lorsque la transparence de la baie n'est pas modifiée ("vit ref") et lorsqu'elle est modifiée par le facteur "a" ("vit mod"). On constate une réduction moyenne de 5°C des températures lorsque la transparence de la baie a été modifiée pour supprimer le risque d'éblouissement. Le confort thermique (PMV < 0,1) qui n'était assuré que pendant 28% du temps lorsqu'il n'y a pas de modification, est réalisé pendant 62% du temps avec un ajustement de la transparence.
Nous n'avons remarqué également :

- que les niveaux d'éclairement étaient encore suffisants lorsque le facteur "a" était maximal. Ce résultat, qui est dû au surdimensionnement de la baie vitrée, évite de faire fonctionner l'éclairage artificiel lorsque la lumière naturelle est très abondante. Cependant, seule une étude exhaustive portant également sur la période hivernale et, en particulier, sur les consommations énergétiques du système de chauffage permettrait de conclure sur l'intérêt d'un tel dimensionnement de baie vitrée.
- qu'il y avait peu de différences dans les valeurs de l'indice d'éblouissement G relatives aux différents observateurs. Comme l'observateur central le plus proche de la baie est le plus défavorisé, il faudra placer à cet endroit un éventuel capteur d'éblouissement. Ce dernier n'existe pas encore mais nous avons défini les principes d'un tel capteur ("éblouimètre") qui pourrait être d'ailleurs très simple car nous avons observé, de manière purement numérique [LAF97b], que l'argument du logarithme de la formule donnant l'indice G pouvait se réduire à un rapport de deux éclairements lumineux judicieusement choisis et facilement mesurables avec des cellules photoélectriques.

L'étude que nous venons de présenter montre, bien qu'elle ne soit que partielle, tout l'intérêt qu'il y a à développer des analyses du couplage "Eclairage/Thermique". En effet, elles contribueront à remplacer progressivement le couple "confort thermique - consommations des systèmes de chauffage/climatisation", aujourd'hui dépassé, par le couple "qualité des ambiances intérieures - consommations globales" beaucoup plus fécond car il répond mieux aux préoccupations des usagers et aux exigences du "développement durable" appliqué au Bâtiment.

Bibliographie :

[**PER90**] R.PEREZ & alii, Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, Solar Energy, vol 44, n° 5, 1990, pp 271 - 289.
[**MIT96**] R.MITANCHEY, M.FONTOYNONT, D.DUMORTIER, Genelux lighting simulation software, Copyright ENTPE - CNRS, (http//Genelux.entpe.fr)
[**CHA83**] P.CHAUVEL, J.B.COLLINS, R.DOGNIAUX, J.LONGMORE, Glare from windows : current views of the problem, Lighting Research and Technology, vol 14, n° 1, 1983, pp 31 - 46.
[**LUC49**] M. LUCHIESH, S.K.GUTH, Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort. Illuminating Engineering, n° 44, 1949, pp 650 - 670.
[**ISO93**] ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique, 1990, 19 pages.
[**OLE87**] B.W.OLESEN, Confort thermique, Revue de Génie climatique n° 7, n° 8 et n° 9, 1987, ISBN 0296-6123.

[LAF97a] P.LAFORGUE, Modélisation visuelle et thermique des sollicitations solairesd et de leurs effets dans le bâtiment. Application à l'étude et au contrôle du "confort radiatif", Thèse de doctorat, Université de Savoie, 7/02/97, 189 pages.
[LAF97b] P.LAFORGUE, B.SOUYRI, M.FONTOYNONT, G.ACHARD, Simulation of visual and thermal comfort related to daylighting and solar radiation in offices buildings, Building Simulation '97, Fifth International IBPSA Conference, 8 - 10 Septembre 1997, Prague, vol 2, pp II 299 - II 307.

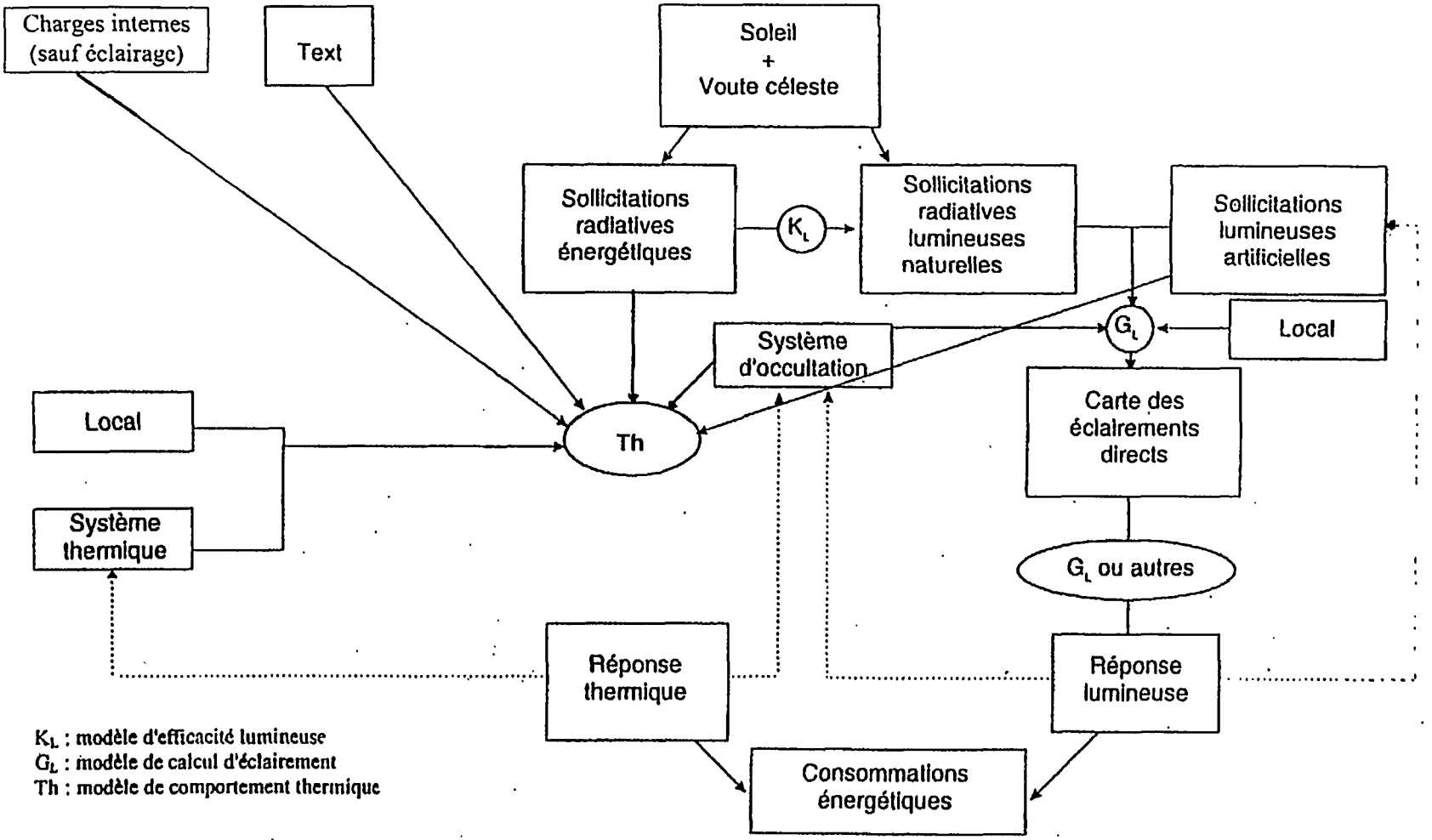


Fig 4 : Architecture générale du modèle de simulation du couplage "Eclairage/Thermique"

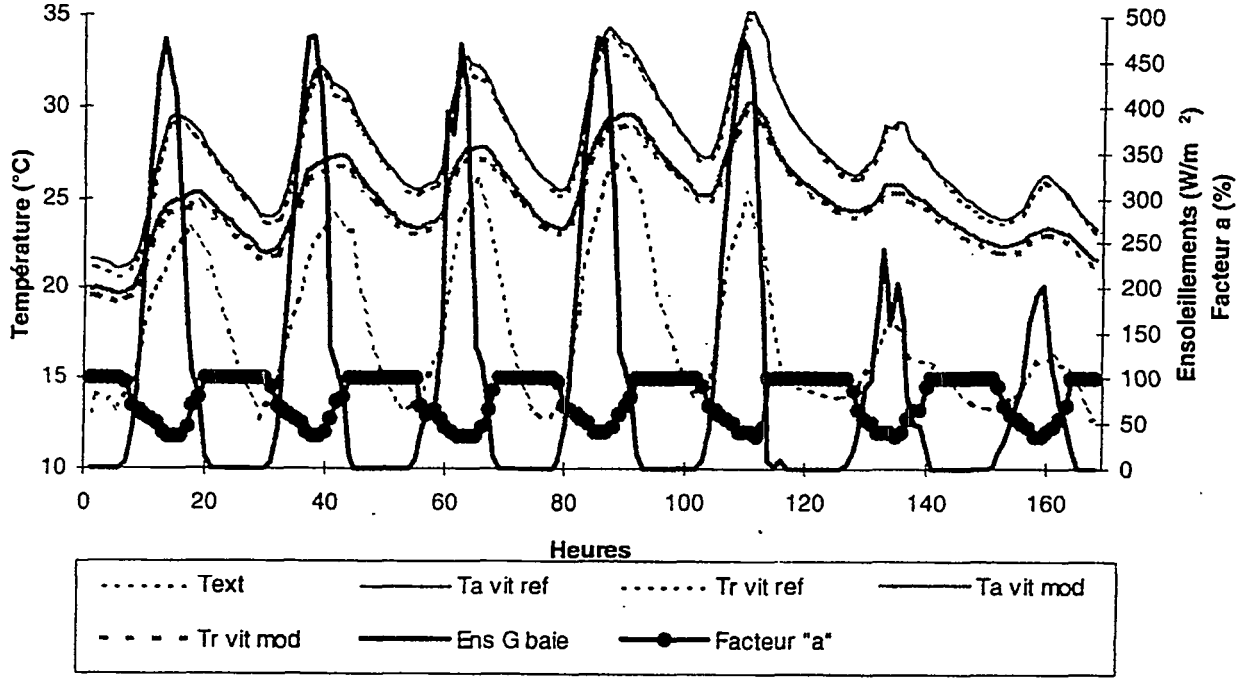


Fig 5 : Influence de la maîtrise du confort visuel (absence d'éblouissement dü aux baies vitrées) sur la température d'un local non climatisé.

Journée SFT « Génie climatique » - 26 Novembre 1997

SIMULATION DU COMPORTEMENT ENERGETIQUE D'ENTITES INDUSTRIELLES BILAN D'ACTION REELLES ET EVOLUTIONS METHODOLOGIQUES

J.P. Nadeau, J.L. Battaglia, P. Sébastian
LEPT ENSAM URA CNRS 873
Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cédex

1. INTRODUCTION

On sait, avec plus ou moins de bonheur, simuler le comportement thermique de machines complexes (échangeurs, vitrines réfrigérées, chaudières, séchoirs,...). Mais ces machines et ces systèmes de transferts de chaleur et de masse (entités) interfèrent entre eux et modifient les ambiances et les besoins énergétiques de leur zone d'influence. En effet, ils génèrent des microclimats dans leur environnement qu'il s'agit de prendre en compte, pour le confort des personnes évoluant dans les zones, pour la pérennité du fonctionnement des entités ainsi que pour la maîtrise des consommations énergétiques.

La complexité des couplages et les difficultés de traitement des bilans ont été abordés différemment et appliqués sur 3 cas liés à des contrats industriels, la simulation aéraulique et thermique d'un supermarché, le comportement hygrothermique d'un chai et la maîtrise de la consume dans les barriques et la modélisation d'entrepôts frigorifiques.

L'expérience acquise alliée aux évolutions connexes des logiques de modélisation du laboratoire nous permettent d'envisager une méthodologie d'appréhension de ces problèmes.

2. SIMULATION AERAULIQUE ET THERMIQUE D'UN SUPERMARCHE

Une grande surface de vente comporte une zone de froid dans laquelle les meubles de conditionnement des produits ont leur fonctionnement affecté par le fonctionnement des autres entités, par la présence des clients et par la météorologie.

Afin d'assurer un fonctionnement normal de ces meubles et d'avoir des conditions de confort correctes, il est nécessaire d'installer un système de conditionnement d'air en chauffage, en refroidissement et maîtrisant de l'humidité.

A l'inverse, le fonctionnement intempestif du conditionnement d'air ou la non gestion de l'humidité vont obérer les performances des vitrines réfrigérées.

La société Bonnet-Névé nous a demandé d'étudier ces interférences.

Une précédente expérience (CETIM-MINERGV2, code de simulation et d'aide au diagnostic énergétique des entreprise de construction mécanique, commercialisé par le CETIM, Centre d'Etudes Techniques de l'Industrie Mécanique), nous a permis de réaliser un code de simulation (WINERG) utilisant une logique de calcul analytique.

2.1. PROBLEMES RENCONTRES LORS DE LA MODELISATION

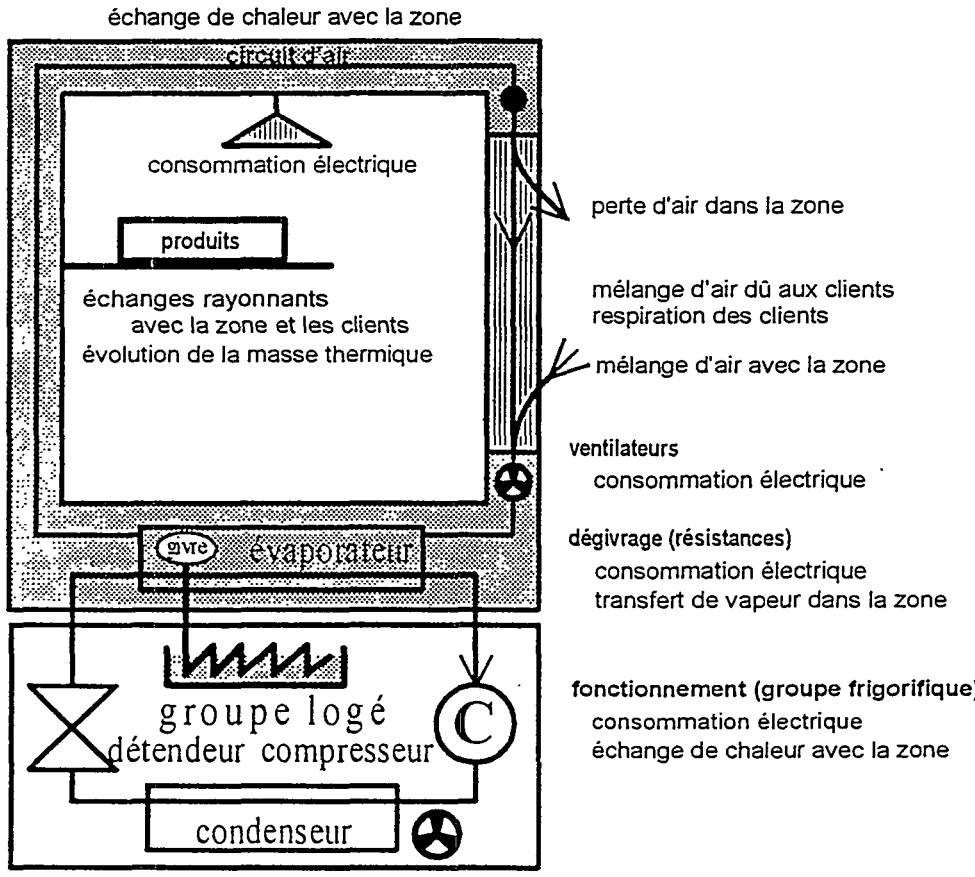
On définit des zones à caractéristiques thermiques supposées uniformes ainsi que des machines de transferts de chaleur et de masse interférant avec le fonctionnement de ces zones.

La logique de calcul consiste à définir les paramètres de confort dans les zones et à calculer, à chaque heure, les paramètres de gestion des différentes entités pour assurer ce fonctionnement. A chaque pas de temps, on effectue l'équilibre massique et thermique de chaque entité. Les modèles de comportement prennent en compte les bilans d'énergie et de masse.

Dans le cas du supermarché, on peut citer :

- stratification des températures,
- transferts aérauliques entre zones,
- rayonnements mutuels,
- givrage et dégivrage des évaporateurs,
- meubles logés avec réévaporation des eaux de dégivrage (figure 1),
- apports des clients,
- gestion de l'humidité ambiante par conditionnement d'air.

Figure 1 : Meuble Vertical Logé, Complexité Et Couplage des Transferts.



La difficulté d'élaboration de tels modèles consiste à garder le même niveau de modélisation pour chaque élément à intégrer dans le code d'aide au diagnostic ou à l'implantation de magasins. Ici aussi, il s'est agit d'avoir une vision fine des phénomènes physiques et de les traduire dans une réduction de modèle assurant la cohérence d'ensemble.

A cette fin, il a fallu analyser plus particulièrement :

- les problèmes de mélange air froid/air ambiant à l'aspiration en partie basse,

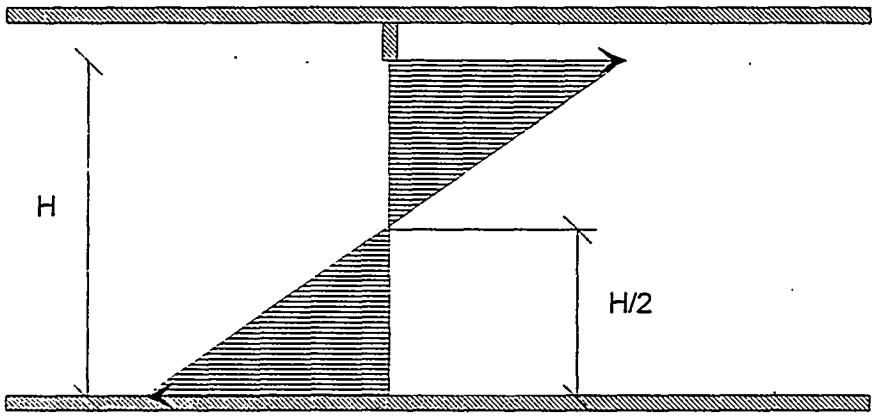
La définition des taux de mélange est le fruit de dépouillement d'essai sur les meubles, essais effectués en salle d'essai climatisé par notre contractant. Ce taux est un paramètre pertinent du fonctionnement du meuble car il intervient, par l'humidité qu'il apporte, dans la cinétique de prise en glace de l'évaporateur. Cette cinétique va influer ensuite sur la consommation énergétique et, si le meuble est logé, sur la gestion de l'humidité au niveau du conditionneur d'air.

- les transferts d'air entre zones adjacentes à températures différentes,

On touche ici à une grande difficulté due à la nécessaire macroscopisation du modèle. La connaissance des transferts aérauliques est une clé de l'équilibre des bilans. L'écriture du débit d'air entre deux zones à température différentes est basée sur les gradients de pression liés à la variation de masse volumique entre les deux zones, sur la perméabilité de la séparation entre les zones et sur les mouvements créés par convection naturelle.

Ce modèle (figure 2) est inspiré d'une étude issue d'un programme interministériel REXCOOP (Mouvements d'air dans les locaux, Habitats climatiques, Cahier N°2).

Figure 2 : Modèle De Transfert A 2 Débits A Travers Une Ouverture.



L'hypothèse induite par ce modèle est du même niveau que tous les modèles utilisés dans le code. Bien sûr, pour traduire des évolutions d'air de manière plus précise, on ne pourrait pas s'en contenter.

Le gradient de pression (variation d'énergie potentielle) est proportionnel au carré du débit créé (énergie cinétique) dans chaque section élémentaire. Le coefficient de proportionnalité est liée à la perméabilité de la paroi et aux températures des zones.

$$dq_v = k_p\sqrt{\frac{2\delta p}{\rho}}Ldz \quad \text{et} \quad \delta p = gz\delta\rho \text{ et avec une répartition triangulaire } q_v = \frac{1}{3}k_pL\sqrt{\frac{2\delta\rho}{\rho}H^3}$$

Le transfert thermique (sensible) peut s'écrire :

$$\phi = q_v\rho Cp\left(T_j - T_{int}\right) = hLH\left(T_j - T_{int}\right) \text{ avec } Nu = \frac{hH}{\lambda}$$

d'où, d'après la relation précédente : $Nu = \frac{1}{3}k_p\,Pr\sqrt{Gr}$

en introduisant le coefficient d'expansion thermique :

$$\phi = \frac{1}{3} k_p \rho \sqrt{g\beta} HL \sqrt{H|T_j - T_{int}|} Cp(T_j - T_{int})$$

et l'expression du débit entre zones :

$$q_v = \frac{1}{3} k_p \rho \sqrt{g\beta} HL \sqrt{H|T_j - T_{int}|}$$

Le k_p est évalué à 0,83 et validé partir de données expérimentales indépendantes de la première étude.

Pour l'utilisation dans le code de simulation, la valeur du k_p doit être adapté pour tenir compte des problèmes liés aux stratifications, aux passages des clients et à la pertinence de l'effet des températures moyennes.

- les infiltrations et exfiltrations au niveau des ouvertures,

Le modèle est équivalent au modèle précédent.

- la modélisation des différents rayonnements.

Le code ne fait pas de différence entre les vitrines du point de vue rayonnement et ne permet pas de prendre en compte les rayonnements relatifs entre meubles.

Seuls sont pris en compte les rayonnement globaux dans la zone entre meubles et environnement à la température de la zone ainsi que les transferts par rayonnement avec les clients lorsqu'ils prennent les produits (les clients sont considérés comme des plaques planes).

2.2. CODE DE SIMULATION

La figure 3 montre, à titre d'exemple, un écran durant une session de travail.

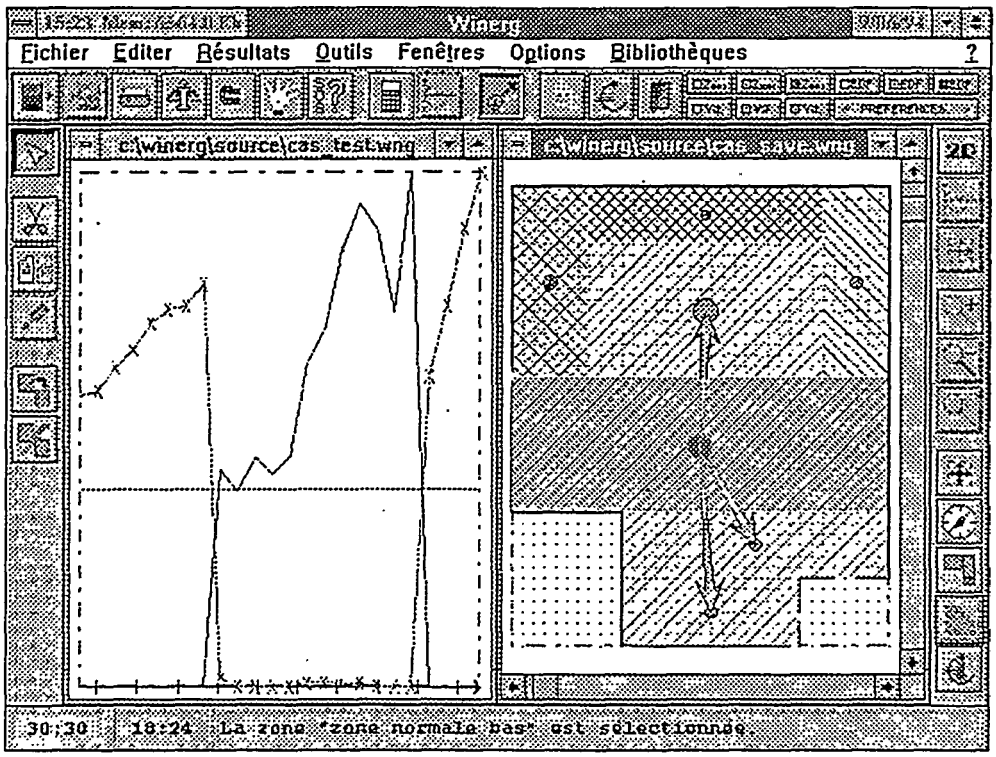
L'utilisateur dessine le magasin, délimite les zones et définit les murs à l'aide de la souris. Une boussole prise dans le menu permet l'orientation. Les meubles sont ensuite implantés dans les zones adéquates, zones qui peuvent être associées à un système de conditionnement d'air.

Avant de lancer le calcul, le supermarché sera lié à une station météorologique donnant la température, l'humidité relative et l'ensoleillement du lieu d'implantation. A cette fin, on utilise des fichiers (avec l'autorisation du CETIM) concernant 6 stations françaises, fichiers que l'on peut modifier pour les adapter au site considéré. La période d'étude (jour, semaine, plusieurs jours, année) est choisie par l'utilisateur.

Lorsque le calcul (quelques secondes) est terminé, l'utilisateur a accès aux informations suivantes :

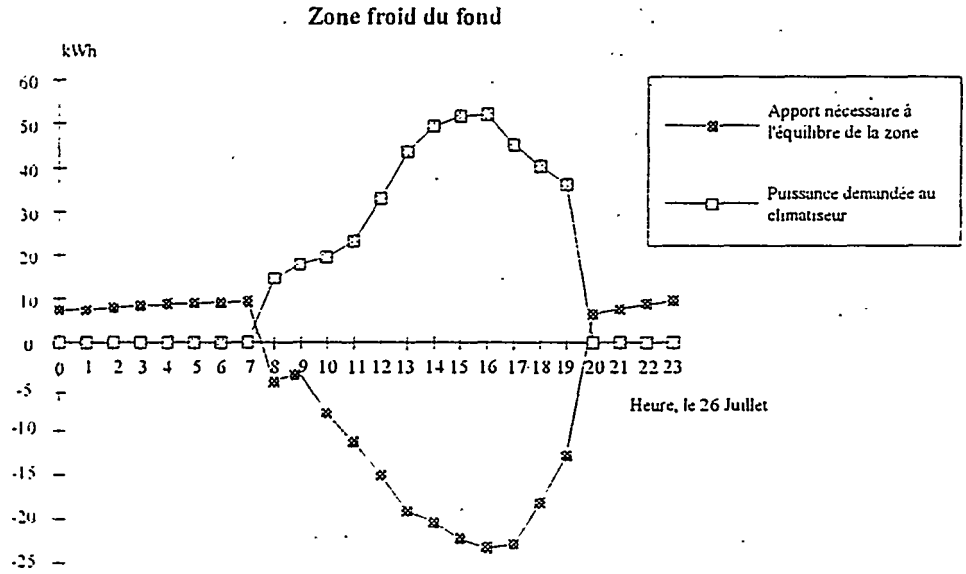
- message d'erreur de fonctionnement d'une entité (permet l'analyse et la correction),
- évolution heure par heure sur un an de l'un quelconque des paramètres de fonctionnement de l'une quelconque des entités du magasin,
- tracé d'un quelconque paramètre en fonction d'un autre quelconque,
- tableaux de données et de résultats.

Figure 3 : Exemple D'écran De Travail WINERG.



La copie d'écran, figure 3, montre le tracé sous logiciel et les résultats, figure 4, montrent l'évolution de la puissance de la climatisation pour une journée d'été tracée à l'aide d'EXCEL (fichiers créés par le logiciel).

Figure 4 : Evolution Journalière De La Puissance De La Climatisation.

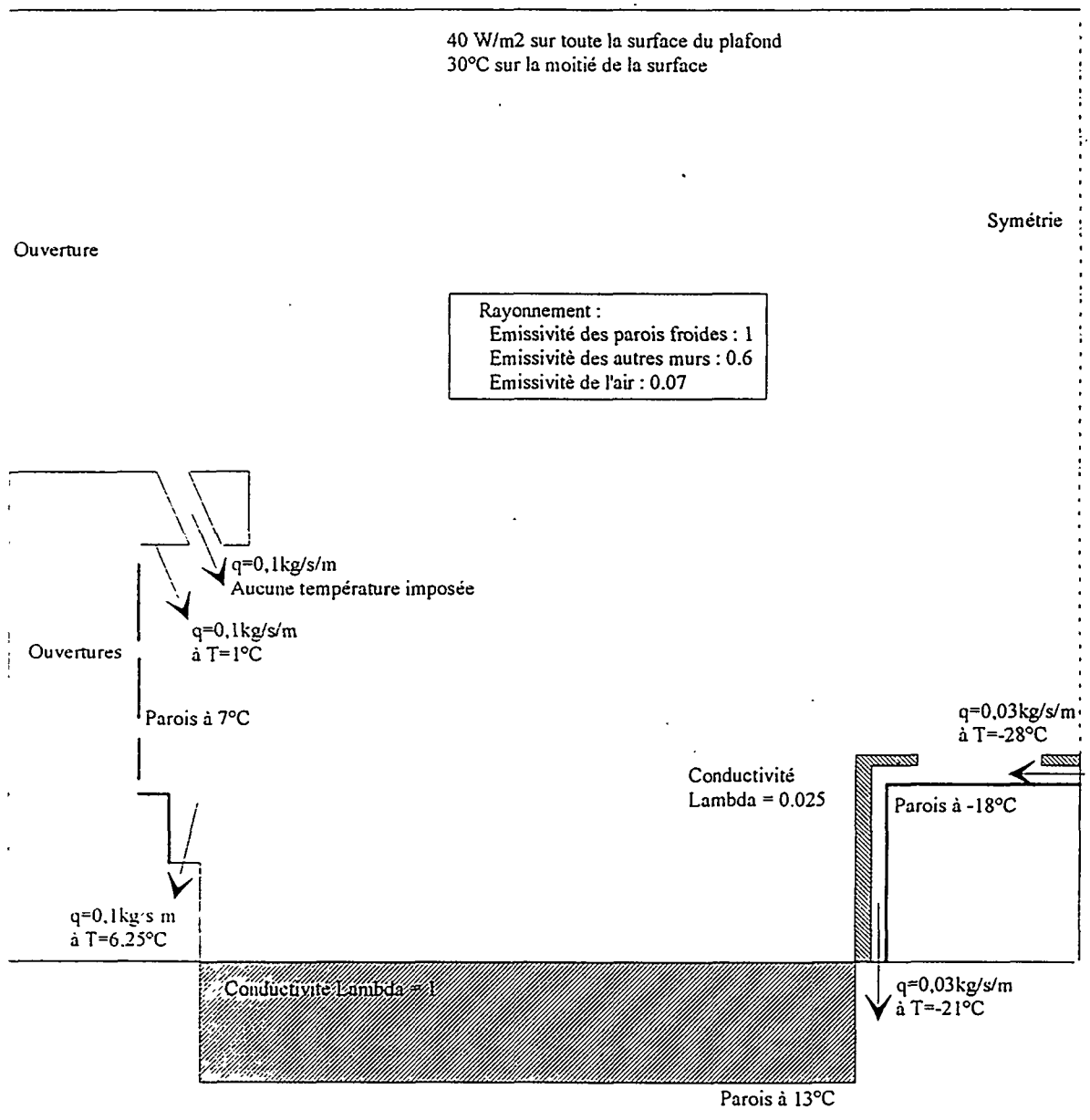


2.3. ANALYSE ET VALIDATION DE LA NOTION DE ZONE

La cohérence de cette modélisation est dépendante de la notion de zone. Il nous a donc paru nécessaire d'étudier la répartition de température dans une zone froide.

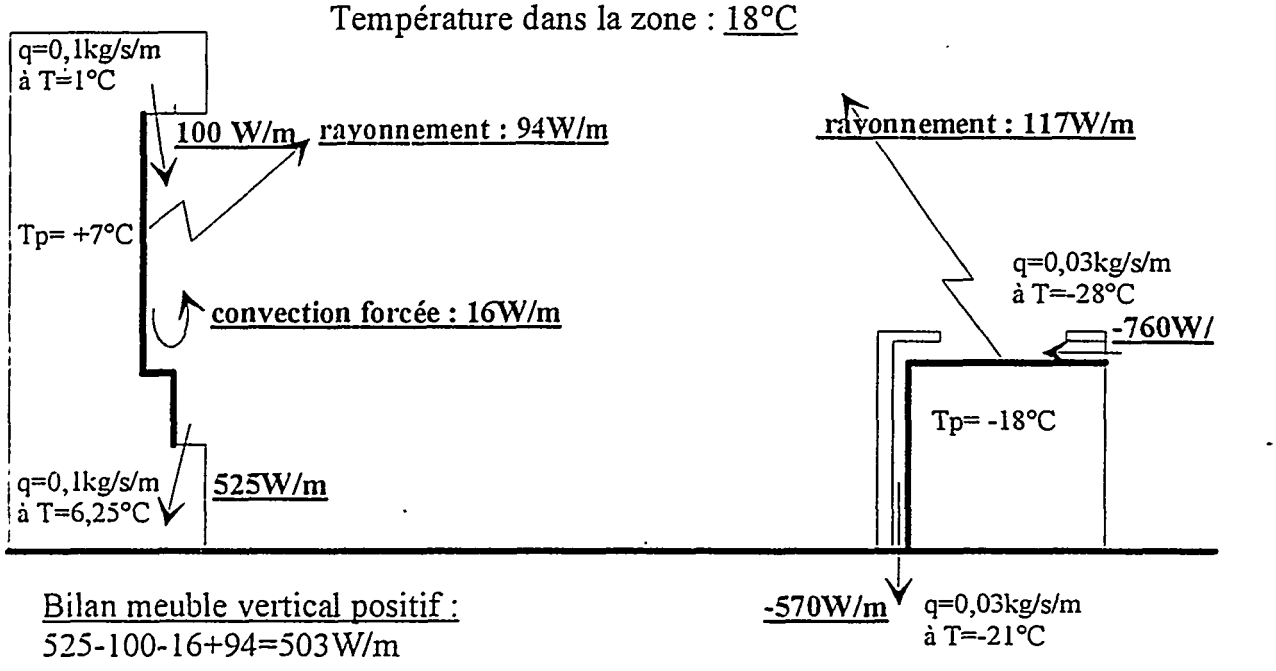
A cette fin, le logiciel FLUENT, nous a permis de simuler les évolutions de température dans une allée entre deux meubles verticaux et un meuble "surgelés" horizontal (figure 5). On ne parlera pas ici de ce logiciel mais on analyse les difficultés de modélisation et on critique les résultats.

Figure 5 : Conditions Aux Limites, Puissance et Débits Par Mètres Linéaires.



Il faut définir des conditions aux limites cohérentes à la fois avec la réalité et les possibilités offertes par le logiciel FLUENT. En particulier nous avons dû, pour le plafond, avoir à la fois la prise en compte d'un rayonnement (40 W/m²) et permettre un transfert convectif en définissant une température (30°C une maille sur 2). Ces conditions aux limites sont validées par la comparaison entre les flux obtenus (figure 6) et les flux donnés par le constructeur mesurés dans une ambiance à 18°C, 60%.

Figure 6 : Validation Des Flux, Puissance et Débits Par Mètres Linéaires.



Bilan meuble vertical positif :
525-100-16+94=503W/m

Bilan meuble horizontal négatif :
-570+760+117=307W/m

Le maillage (389000 mailles) a conduit à des temps de calcul importants (3 jours pour une station SUN).

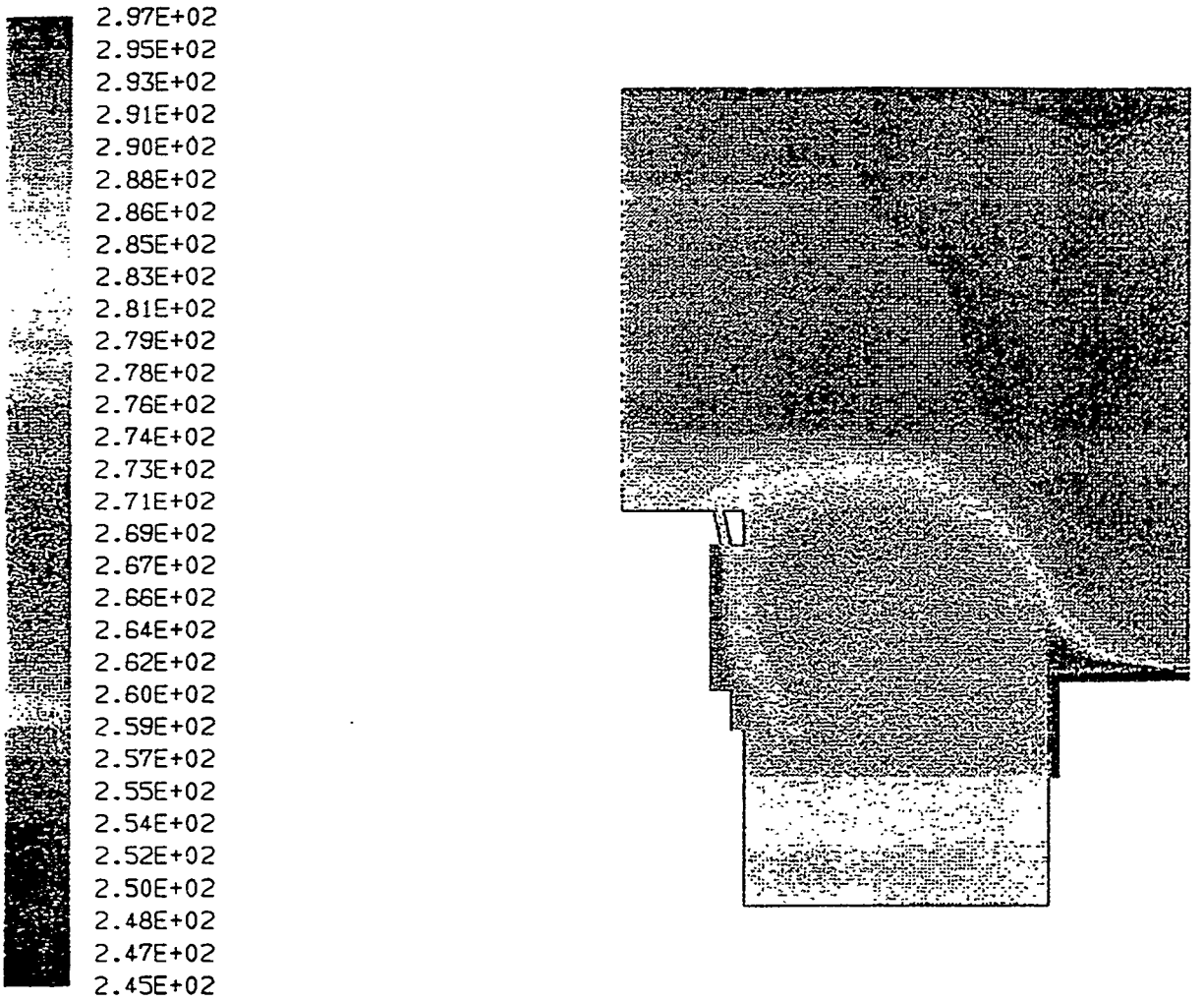
Les résultats en température, exprimés figure 7, montrent l'existence d'une bulle froide, pertinente d'une température de zone. Cette bulle est principalement due au rayonnement des produits exposés mais aussi au refroidissement par l'air du double rideau ainsi qu'au faible entraînement d'air (mais à -28°C) provenant du bac horizontal.

On retrouve donc l'effet baignoire recherché par le constructeur, effet gage d'un faible réchauffage des meubles.

La température de la bulle, malgré tout assez basse, est liée à 2 causes :

- effet important du rayonnement de l'air, FLUENT (dans notre version) ne permet pas de corréler l'absorption à l'humidité relative,
- la modélisation 2D ne prend pas en compte les perturbations dues aux passages de clients et aux entrées d'air par les allées perpendiculaires.

Figure 7 : Carte Des Températures, Effet De L'absorption De L'air (0,07).



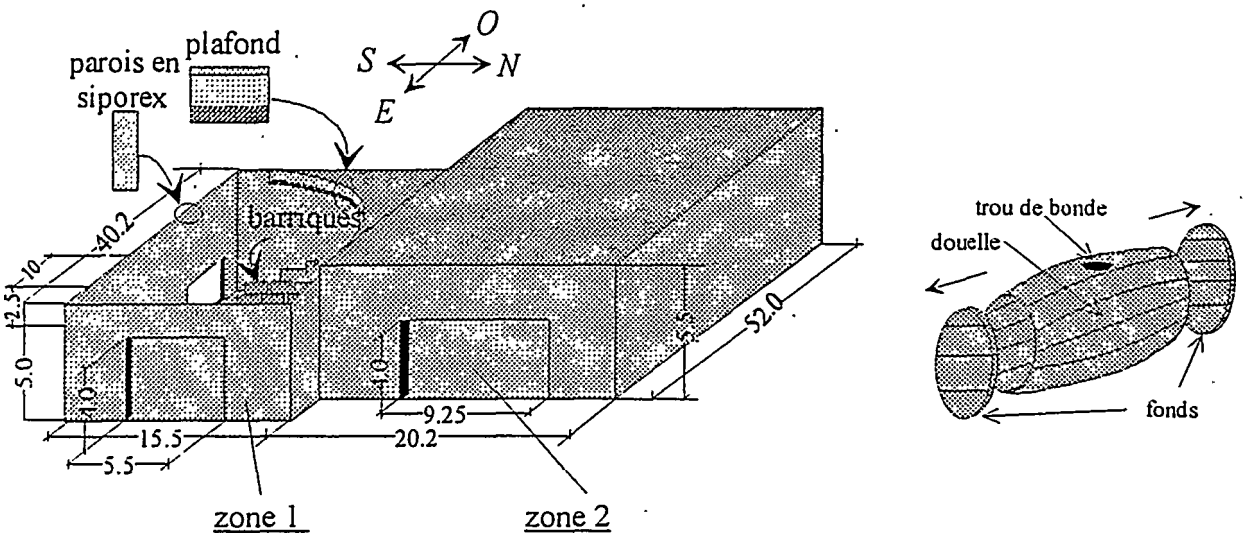
3. SIMULATION DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE D'UN CHAI

Il s'agit de simuler le comportement hygrothermique d'un chai (figure 8). contenant des barriques pleines, en régime instationnaire afin :

- de quantifier la participation des différents éléments constitutifs du chai aux transferts de chaleur et d'humidité.
- d'évaluer la consume (pertes dans les barriques),
- d'évaluer les besoins énergétiques pour la régulation en température et humidité.
- d'optimiser la conception du bâtiment.

Contrairement au code précédent. le calcul se fait en régime instationnaire.

Figure 8 : Chai Instrumenté Pour Validation Du Code Et Schéma D'une Barrique.



3.1. PROBLEMES RENCONTRES LORS DE LA MODELISATION

Pour la simulation, il est nécessaire de disposer des mesures de température extérieure, d'humidité relative extérieure et de rayonnement solaire. A partir de ces données et des caractéristiques du bâtiment le code permet de simuler l'évolution de la température et de l'humidité relative ambiantes dans chaque zone formant le bâtiment. Les données concernant les échanges direct d'air entre l'intérieur et l'extérieur sont évalués et supposés invariants. La température et l'humidité relative sont supposées uniformes par zone.

La modélisation repose sur le bilan de masse de vapeur d'une part, et sur le bilan d'enthalpie totale (sensible + latente) d'autre part. Dans ces bilans interviennent des variables attenantes au comportement des parois, barriques et autres termes sources. Ces variables sont calculées en modélisant le comportement hygrothermique de ces divers éléments. Selon la structure du bâtiment, une étude préalable permet de quantifier la contribution massique des parois et des barriques sur le bilan massique en vapeur. Dans la plupart des cas, on montre ainsi qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte la contribution en masse de vapeur des parois devant celles des barriques et du renouvellement d'air, qui sont beaucoup plus importantes. Ceci permet de réduire le nombre de données nécessaires à la simulation ainsi que les temps de calculs.

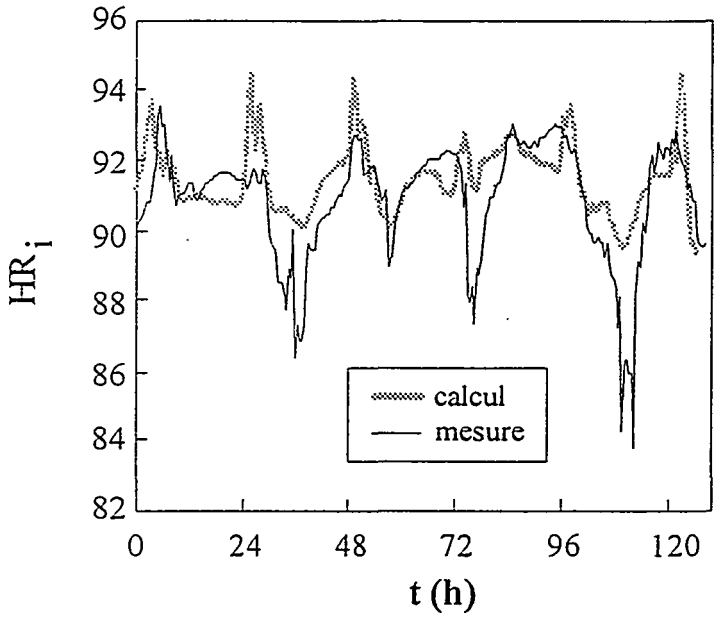
Les transferts d'air entre zones et les renouvellements d'air dus aux infiltrations au niveau des ouvrants non étanches ou à l'ouverture de ceux-ci pour l'accés aux bâtiments sont définis par des débits. Ils dépendent de la météorologie et de l'exposition du chai. Les infiltrations sont estimées à partir du DTU « Règles Th-G » (1988, Cahiers de CSTB).

3.2. CODE DE SIMULATION

Les différentes équations (bilan de masse de vapeur, bilan d'enthalpie totale, transfert de chaleur dans l'enveloppe, transfert couplés de chaleur et de masse dans la coque de barrique) sont discrétisées à partir de la méthode des différences finies. La discrétisation en temps faisant appel au schéma classique de Cranck-Nicholson.

Ce code est utilisé dans le logiciel BATIM version 1.2 sous Windows 95 et NT et commercialisé par la Fédération Départementales des Centres d'Etudes Oenologiques et Informatiques.

Figure 9 : Comparaison Entre L'humidité Relative Calculée Et Celle Mesurée (Zone 1).



En plus de l'évolution des variables d'ambiance (figure 9) le logiciel permet de simuler le flux de vapeur évaporée à la surface des barriques et d'évaluer ainsi les pertes (consume) sur la période de vinification (Tableau 1). Il est d'autre part possible de calculer à chaque instant les puissances sensible et latente nécessaires à la régulation des variables d'ambiance.

Tableau 1 : Evaporation En Surface De Barriques Dans Le Chai, Consume.

Saison	T_i(°C)	HR_i	Flux matériel en surface de barrique (kg/m²s)	Masse totale évaporée (kg)	Consume
Hiver T_e =8°C HR_e =90% Φ_{ray} =200W/m²	7,79	0,955	$1,3865\ 10^{-7}$	808	0,71%
Printemps T_e =15°C HR_e =90% Φ_{ray} =300W/m²	14,56	0,978	$2,6520\ 10^{-7}$	1546	1,37%
Eté T_e =25°C HR_e =75% Φ_{ray} =350W/m²	23,96	0,867	$5,9483\ 10^{-7}$	3469	3,08%
Automne T_e =17°C HR_e =80% Φ_{ray} =250W/m²	16,28	0,913	$4,2754\ 10^{-7}$	2493	2,21%

4. SIMULATION AERAULIQUE ET THERMIQUE D'ENTREPOTS FRIGORIFIQUES

Le projet, en cours de développement, a pour but d'analyser le fonctionnement d'entrepôts frigorifiques et de mettre en place une démarche permettant d'étudier les phénomènes thermo-aérauliques qui conditionnent le bilan énergétique et la chaîne du froid dans ces entrepôts. Cette analyse s'appuie sur des mesures effectuées au sein d'un entrepôt de la société des Transports Frigorifiques Européens dont la surface au sol est proche de 5000 m². Ces mesures nous ont permis de mettre en valeur les problèmes posés par les méthodes classiques de détermination des échanges qui conditionnent le fonctionnement d'un entrepôt frigorifique.

4.1. PROBLEMES RENCONTRES LORS DE LA MODELISATION

Le bilan énergétique de l'entrepôt a été reconstruit à partir de l'estimation des flux d'air qui le traversent, des fuites thermiques par les parois, des apports énergétiques et de vapeur des individus, du produit et des appareils. L'estimation des flux d'air s'appuie sur des mesures anémométriques effectuées sur le site, sur des corrélations de pertes de et sur l'observation des temps d'ouvertures de portes ou des fuites de l'entrepôt. Le fonctionnement des groupes frigorifiques a été étudié en mesurant les quantités d'eau dégivrées par les différents évaporateurs et à partir des mesures d'appels de puissance électrique. Le bilan s'est aussi appuyé sur la mesure des températures en différents points du site. Ce bilan thermique nous a permis de retrouver 75% de la facture énergétique de l'entrepôt et des bâtiments annexes sur une année, ce qui compte tenu des fortes variations climatiques et de produits entreposés ou des incertitudes liées à certains paramètres est satisfaisant.

Cette étude montre les problèmes concrets rencontrés par les transporteurs pour garantir le respect de la chaîne du froid et en particulier la nécessité de connaître et de contrôler les écoulements d'air dans l'entrepôt.

4.2. EVOLUTION DU CODE DE SIMULATION

Actuellement, nous développons un code de calcul qui permettra de mieux maîtriser le bilan énergétique et les écoulements d'air dans un entrepôt frigorifique.

Ce code se heurte a deux difficultés :

- la complexité et la diversité des données nécessaires à l'élaboration d'un tel bilan,
- d'autre part, les problèmes numériques rencontrés dans la détermination des écoulements d'air dans l'entrepôt dont le comportement est toujours instationnaire.

5. CONCLUSION

Les deux premiers codes vérifient les cahiers des charges fixés par nos contractants, cependant la prise en compte des transferts entre zones n'est pas satisfaisante. La vision macroscopique de ces deux codes ne peut, en aucun cas, représenter correctement ces échanges aérauliques, trop facilement perturbés par l'environnement.

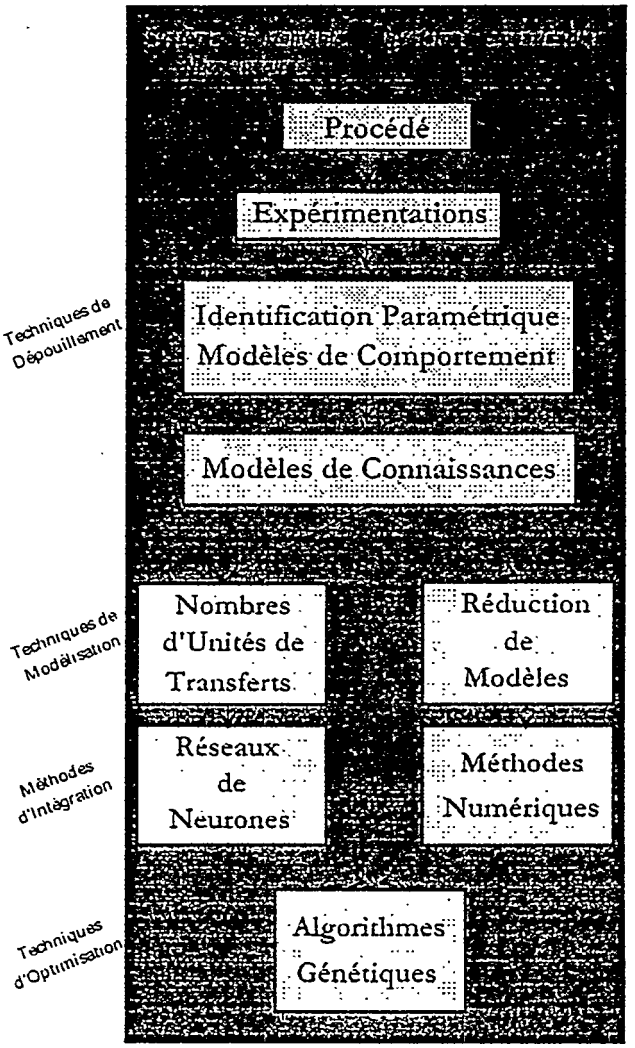
Le troisième code, dans sa nouvelle version, aborde ces transferts complexes en faisant appel à des des outils que nous utilisons ou que nous développons au sein du laboratoire comme la méthode des perturbations ou l'utilisation des réseaux de neurones. Nous les détaillons ci-après.

6. PERSPECTIVES

6.1. GESTION ET CONCEPTION DES PROCEDES ET ENTITES COMPLEXES

Les outils classiques de modélisation sont souvent mal adaptés à l'optimisation des procédés complexes et à la définition de leur stratégie de commande. Il est nécessaire de simuler le fonctionnement du système industriel dans un très grand nombre de configurations différentes. Les simulations qui s'appuient sur des modèles classiques sont en général très lentes car elles font appel à la détermination de variables internes au système simulé, inutiles du point de vue de son optimisation. D'autres méthodes permettent de pallier ces problèmes. Elles sont basées sur des intégrations analytiques ou sur l'apprentissage de modèles classiques et utilisent des outils tels que les Nombres d'Unités de Transferts, la Réduction de Modèles ou les Réseaux de Neurones. Ces outils, par leur rapidité, permettent d'aborder d'une manière radicalement différente l'optimisation des procédés complexes. Ils permettent, dans les cas que nous avons validé, de multiplier le nombre de simulation du fonctionnement d'un procédé d'un facteur de l'ordre de 100 à 1000 par rapport aux méthodes classiques.

Figure 10 : Positionnement Des Méthodes Dans Une Etude.



La complexité des processus physiques et des procédés que nous étudions nous amène aussi à utiliser et à développer des outils d'identification paramétrique et des modèles de comportement. Ces outils sont issus de l'automatique et du traitement du signal. Ils nous permettent de traiter et d'interpréter les données expérimentales qui nourrissent nos modélisations (cinétiques de séchage, cinétiques chimiques, diffusivités, coefficients d'échanges, etc).

La rapidité de simulation d'un procédé complexe à l'aide des modèles intégrés (Nombres d'Unités de Transferts, Réduction de Modèles, Réseaux de Neurones) nous permet d'optimiser finement son fonctionnement. Les méthodes d'optimisation que nous utilisons s'appuient sur des algorithmes génétiques. Ces algorithmes explorent un champ de solutions technologiques (choix de composants, de niveaux de puissances, etc.) pour optimiser les coûts, définir la conduite et garantir la sûreté de fonctionnement du procédé et la qualité du produit traité.

6.2. OUTILS ET METHODES

6.2.1. IDENTIFICATION PARAMETRIQUE, MODELES DE COMPORTEMENT

Les techniques d'identification de paramètres et de modèles de comportement sont issus des Méthodes Inverses. Ces techniques utilisent des données expérimentales caractéristiques du comportement dynamique d'un système. Elles permettent de modéliser le fonctionnement du système et d'identifier des paramètres inconnus nécessaires à la construction d'un modèle de connaissance. Pour caractériser un procédé, on teste les données expérimentales afin de définir les différentes corrélations entre les sollicitations et les mesures. Ensuite, la procédure d'identification est choisie parmi les différentes méthodes existantes en fonction des données, du modèle et des variables. Enfin, on détermine le domaine de validité des variables associées.

6.2.2. REDUCTION DE MODELES

La simulation du fonctionnement d'un procédé passe généralement par l'élaboration d'un modèle physique du système et par sa résolution à l'aide de méthodes numériques (différences finies, éléments finis ...). Ces méthodes utilisent un nombre de paramètres proportionnel aux nombre de noeuds de la discrétisation du modèle physique. La réduction du modèle permet de diminuer le nombre de ces paramètres, tout en gardant une bonne précision sur les résultats fournis par la simulation. La réduction du modèle s'appuie sur un changement de base. Le passage dans la base modale est très souvent utilisé car il fournit de précieux renseignements sur le comportement dynamique du système sous la forme de modes propres d'évolution. La réduction consiste à ne conserver que les modes propres dominants du système, ce qui réduit considérablement la dimension de l'espace des variables d'état. Les modèles réduits permettent de simuler le comportement dynamique d'un système avec une excellente précision et beaucoup plus rapidement que le modèle physique complet. Ils peuvent ainsi s'intégrer dans des lois de commande.

6.2.3. NOMBRES D'UNITES DE TRANSFERTS, RESEAUX DE NEURONES

La première étape nécessaire au traitement d'un procédé fortement non linéaire consiste à construire puis assembler des éléments qui modélisent les composants de l'entité. Ces éléments peuvent être des composants technologiques comme des ventilateurs ou des régulateurs. Ils peuvent aussi être des volumes élémentaires dans lesquels nous intégrons des lois de conservation et des fonctions de transferts. Les modèles associés à ces éléments sont réduits à l'aide de Nombres d'Unités de Transferts thermiques ou massiques. Pour accélérer la simulation du procédé, nous intégrons par apprentissage et à l'aide de réseaux de neurones le comportement thermique et les échanges au sein des éléments. Le procédé avec tous les

éléments qu'il intègre est alors simulé en faisant interagir les réseaux de neurones associés à chaque élément du procédé.

6.2.4. ALGORITHMES GENETIQUES

Les algorithmes génétiques sont des outils simples à mettre en oeuvre et extrêmement robustes. Ils permettent d'optimiser dans un procédé, des variables continues comme des niveaux de températures ou de puissance, aussi bien que des choix de composants ou des stratégies de conduites. Nous les utilisons pour des optimisations multi-critères associant des coûts, des critères de qualité et des critères de sûreté.. Ils peuvent par ailleurs conduire à plusieurs solutions exploitables laissant ainsi à l'utilisateur la possibilité de choix.

6.3. PUBLICATIONS DU LABORATOIRE SUR CES THEMES ET CES OUTILS

BATTAGLIA J.L., GOUNOT - Réduction du modèle thermique d'un système linéaire par identification des paramètres d'un modèle de transfert - Revue Générale de Thermique, 34, 608-619, 1995

BATTAGLIA J.L., JOMAA W., GOUNOT J., - Modèle simplifié du comportement hygrothermique d'un chai, J. Phys. III France , 6, 1565-1553, 1996

BATTAGLIA J.L., , Recherche du modèle simplifié du comportement thermique d'un système de freinage par disque, Congrès SFT 96, Valenciennes, 13-15 mai 1996

BATTAGLIA J.L. - Identification de paramètres, identification de modèles et réduction de modèles avec Matlab® - Journée SFT: "Application à la thermique des nouveaux outils informatiques" Paris 26 Mars 1997

GUILMAIN Ch., JOMAA W., POYET P.(o) - Drying of oak under vacuum with superheated steam. Part 1: Heat and mass transfer modelling - Actes de IUFRO International Conference on wood drying " Vacuum drying of wood 95 ", 131-138, High Tatras, Slovaquie, 8-12 octobre 1995

GUILMAIN Ch., BAIXERAS O., JOMAA W. - Discontinuous and convective vacuum drying of oak: experimental and modelling studies - 5th Int. IUFRO wood drying conference, Québec, CANADA, 13-17 aout 1996

HUGGET A., SEBASTIAN P., -Modélisation de Séchoirs à tapis. Utilisation des Réseaux de Neurones, Rev. Gen. Thermique35, 599-614, 1996

HUGGET A., NADEAU J.P., SEBASTIAN P.,- Evolution des méthodes de modélisation des séchoirs et d'optimisation de leur conduite, Cahiers de l'AFSIA, 15èmes journées de l'AFSIA, Avril 1997

HUGGET A., NADEAU J.P., SEBASTIAN P.,- Optimisation multi-critères de Séchoirs: Utilisation des Réseaux de neurones et Algorithmes génétiques, journées d'études SFT, mars 1997

JOMAA W., BAIXERAS O. - Modelling and experimental studies of discontinuous vacuum drying of oak, 10th International Drying Symposium, 30 juillet - 2 aout 1996, Cracovie (Pologne), juillet 1996

NADEAU J.P., (1992), Aide au diagnostic énergétique, le logiciel CETIM-MINERGV2, Journée SFT, Formation Supérieure en Energétique Industrielle, outils innovants et expériences pédagogiques, SFT.

NADEAU J.P., PUIGGALI J.R., (1995), Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, Tec. et Doc. Lavoisier, Paris.

NADEAU J.P., JOMAA W., LANGUMIER J.V. (1995) - Optimisation aéraulique et acoustique d'un système d'induction d'air avec prise en compte de contraintes industrielles - Colloque "Ingéniérie simultanée" Priméca 95, Actes, 325-330, La Plagne, 3-5 avril 1995

NADEAU J.P., MASSOUH F., MORILLON C, (1996), Simulation du comportement aéraulique et thermique de la zone froid d'un supermarché, *Revue Pratique du Froid*, 01/96.

SEBASTIAN P., NADEAU J.P., PUIGGALI J.R. : Les réseaux d'Unités de Transfert, thermique, massique, outils pertinents d'analyse de séchoirs. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol 36, n° 7, 1763-1772, 1993

SEBASTIAN P., NADEAU J.P., PUIGGALI J.R. : Les Nombres d'Unités de Transfert, thermique, massique, outils rapides de simulation de séchoirs. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol 36 n° 7, 1773-1782, 1993

SEBASTIAN P., NADEAU J.P. , PUIGGALI J.R., -Designing Dryers Using Heat and Mass Exchange Networks: An Application to Conveyor Belt Dryers, Trans IChemE, Vol 74, Part A, 1996.

CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

Modélisation et simulation : un « état de l'art »

Roger Pelletret

Président d'IBPSA France

CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

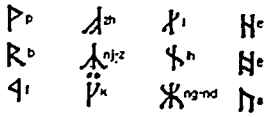
ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

Techniques de modélisation / Validité des modèles

Besoins des utilisateurs



Langages de modélisation



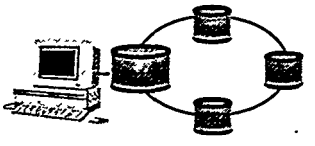
Transfert vers les professionnels

Outils de simulation

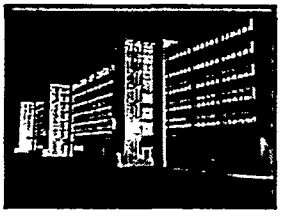


Echanges de données

Serveurs de modèles



Réalité Virtuelle



CSTB
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

Langages de modélisation

PROFORMA

ULM

NMF
urd.ce.kth.se/NMFintro/nmfint.htm

OLMECO
www.rt.el.utwente.nl/~bnk/olmeco.htm

MODELICA
www.Dynasim.se/Modelica/

CSTB
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

Outils de simulation

www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory/

ESACAP
CLIM 2000

IDA
urd.ce.kth.se/

NEPTUNIX
ALLAN

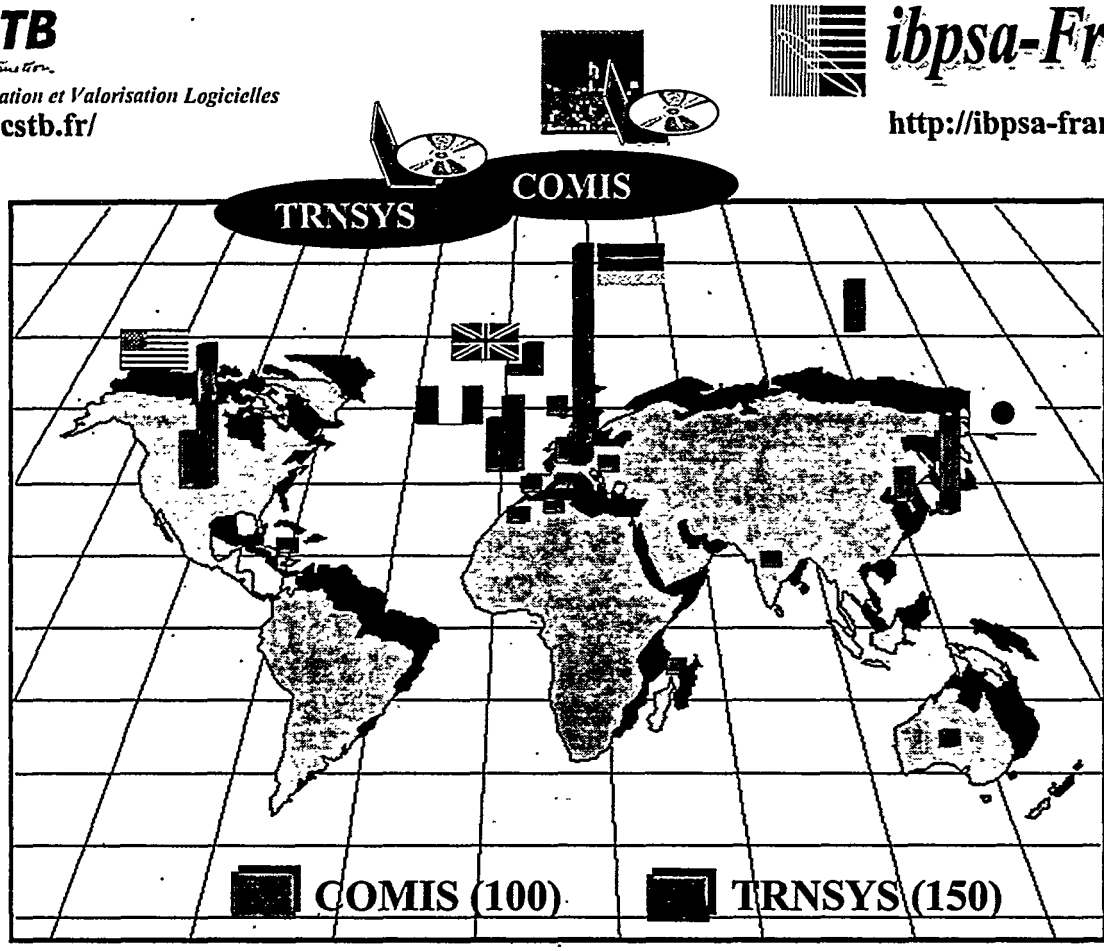
TRNSYS
evl.cstb.fr/francais/projets/IISiBat/trnsys14.htm

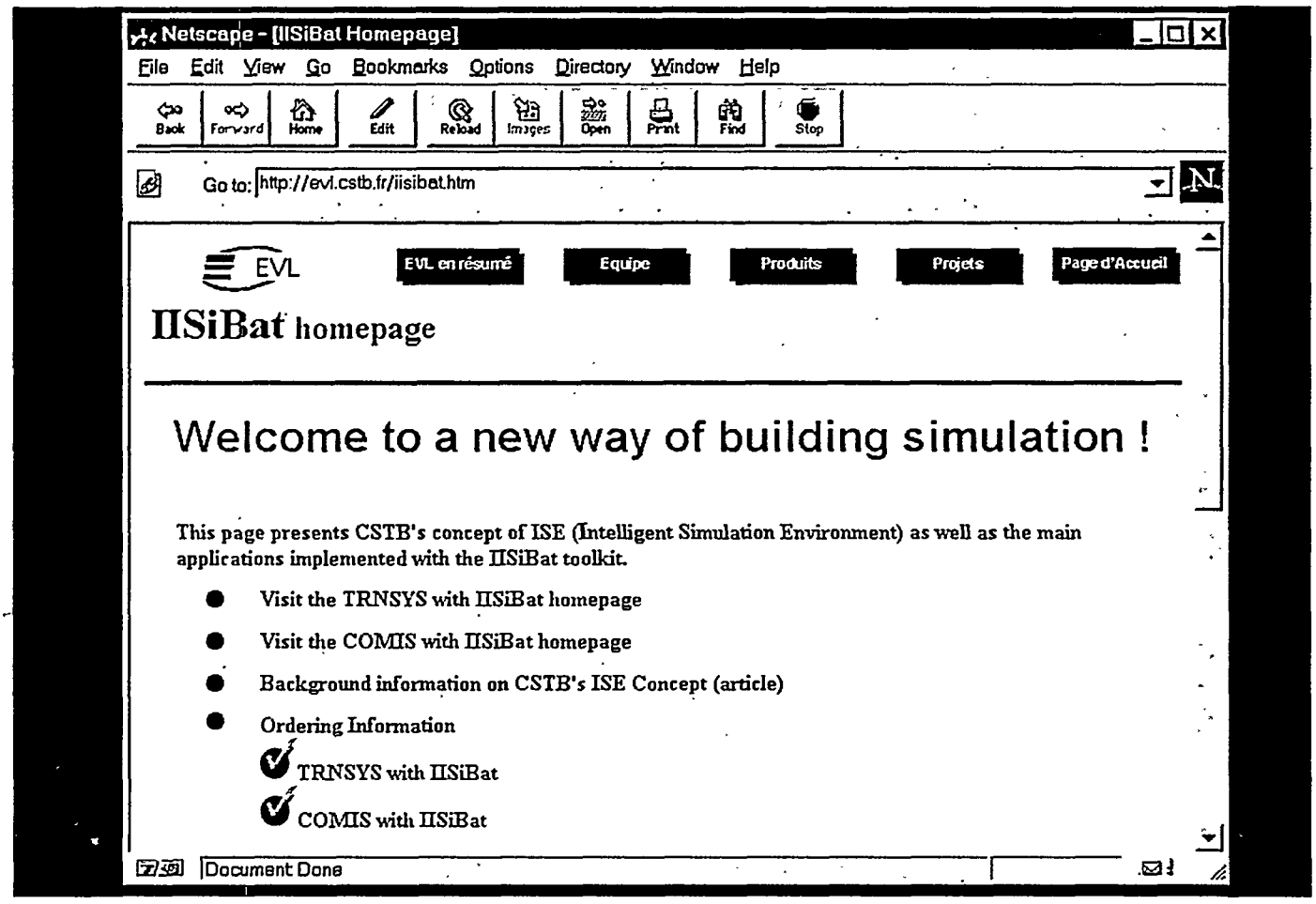
SPARK

SIMULINK

CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/





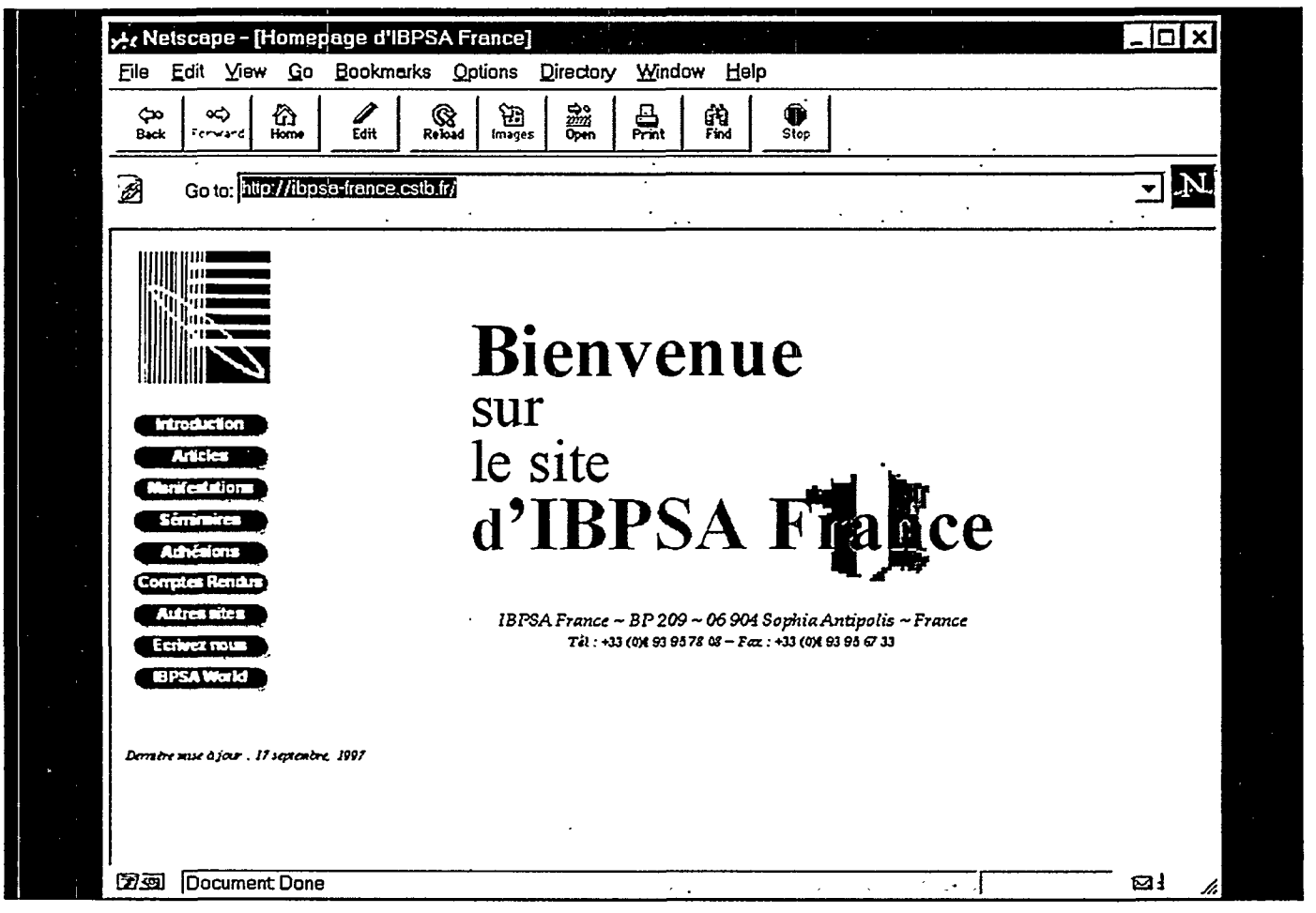
CSTB
le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

Transfert vers les professionnels

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

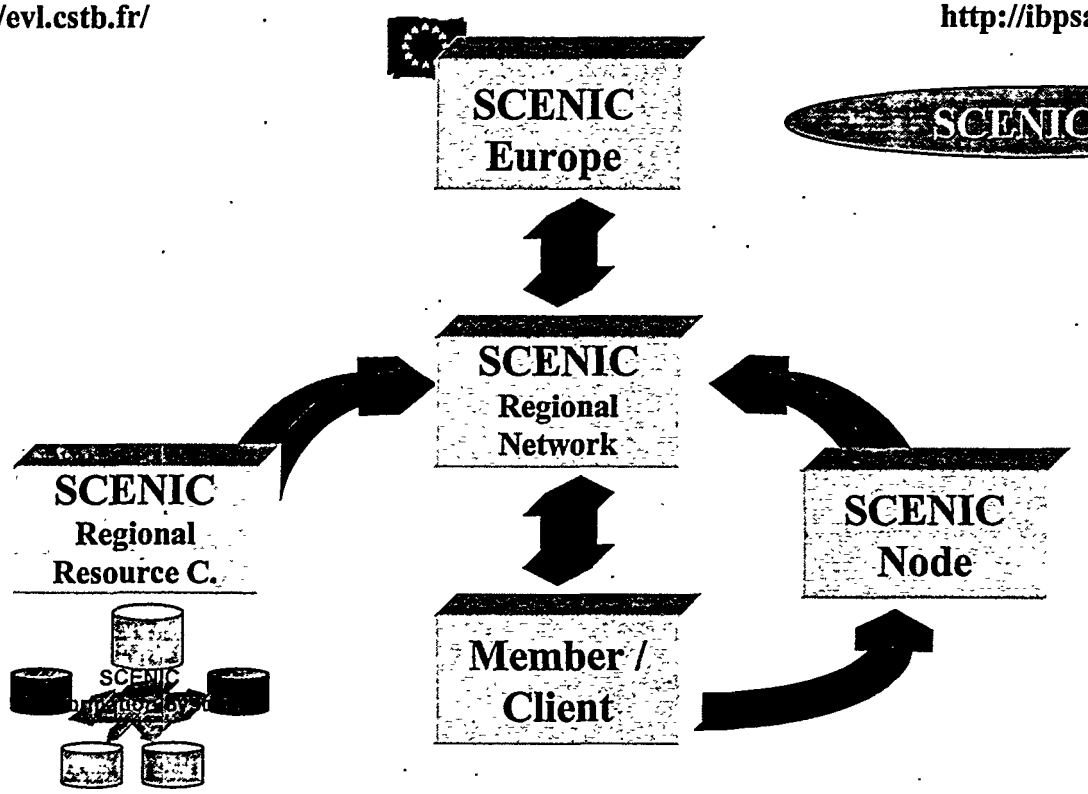
IEA Annex 30
Bringing Simulation to Practitioners

SCENIC



CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

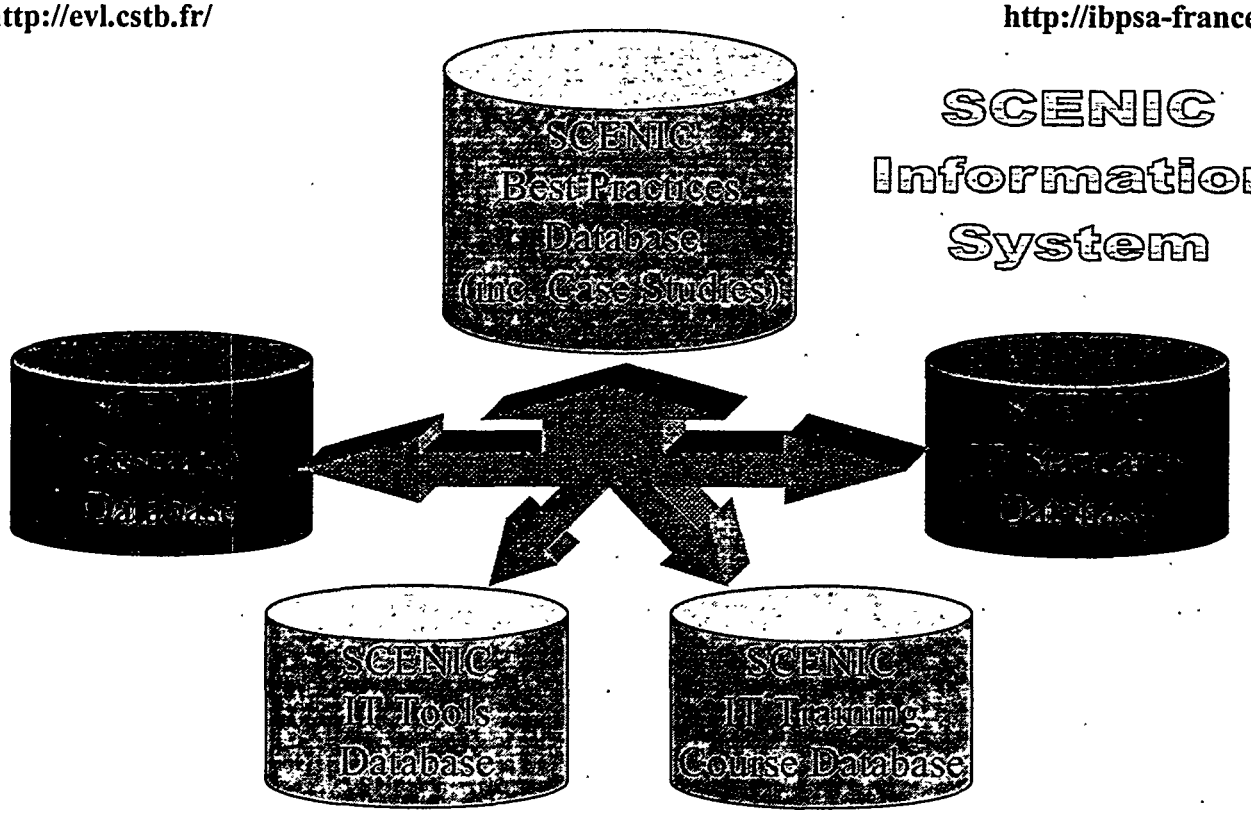
ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

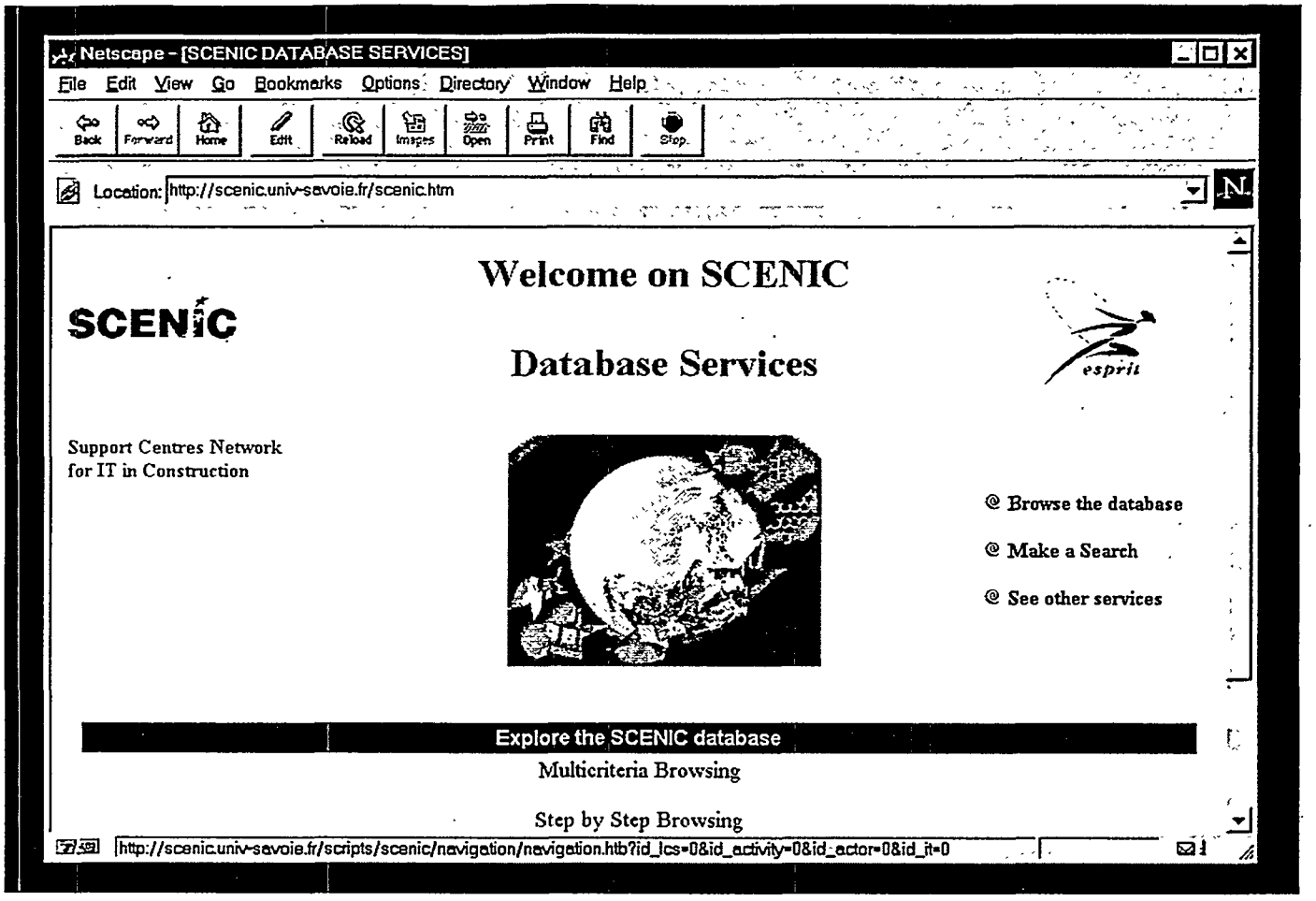


CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

SCENIC Information System





CSTB

Division Evaluation et Valorisation Logicielles

http://evl.cstb.fr/

Besoins des utilisateurs

ibpsa-France

http://ibpsa-france.cstb.fr/

Des modèles utilisables

validés,

peu de paramètres, des paramètres « métier »,

valuation des paramètres à partir de banques de données

échanges de données entre logiciels (dont CAO)

Des logiciels simples d'accès

modèles simplifiés versus modèles complexes « encapsulés »

des pré-processeurs avancés

Des calculs rapides

solveurs performants, études paramétriques, analyse de sensibilité, propagation des erreurs

Des logiciels évolutifs

des librairies de modèles

Des postprocesseurs avancés

éditeurs de courbes intégrés, importations des données dans des tableurs du commerce

réalité augmentée

Des services d'accompagnement

sites web, forums, formations, aide à la modélisation, bibliothèques de projets

CSTB
Le futur en construction
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

IAI

Industry Alliance for Interoperability

Structures

CAO



Air conditionné

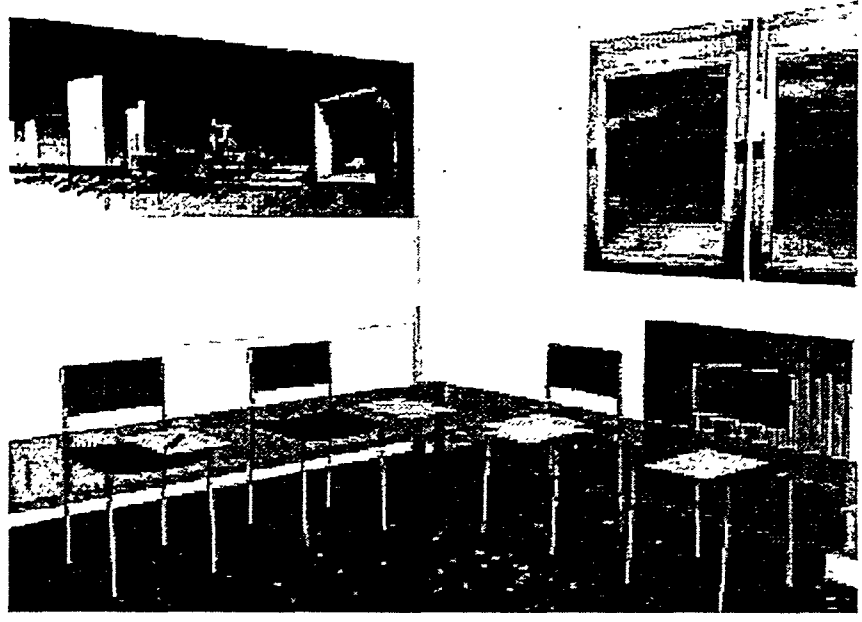
Equipements

http://www.interoperability.com/

CSTB
Division Evaluation et Valorisation Logicielles
http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France
http://ibpsa-france.cstb.fr/

Réalité Virtuelle



CSTB

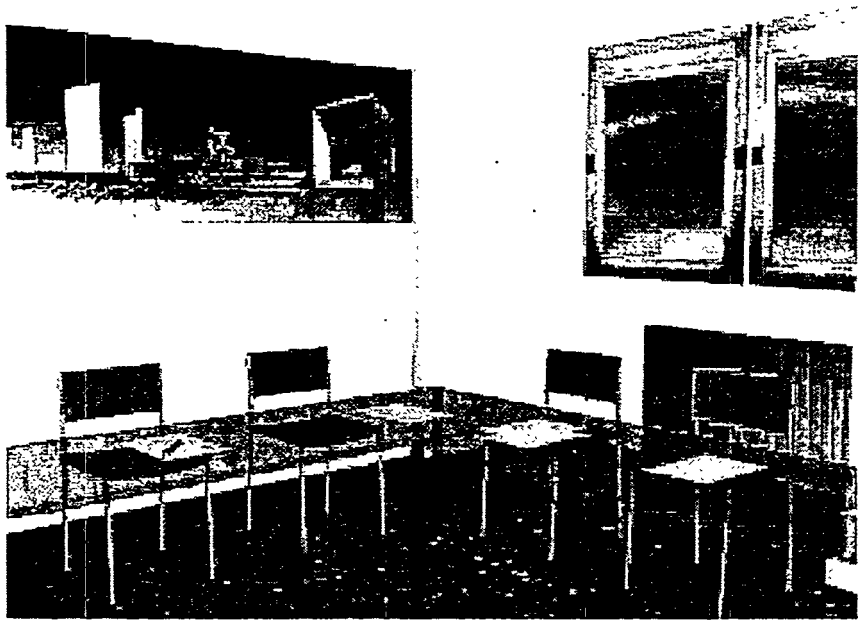
Division Evaluation et Valorisation Logicielles

http://evl.cstb.fr/

ibpsa-France

http://ibpsa-france.cstb.fr/

Réalité Virtuelle



Génération automatisée d'une simulation thermique et aéraulique dans le bâtiment

M. MUSY[1], E. WURTZ[1], S. GAGNEAU[2]

[1] LEPTAB, Université de La Rochelle.
[2] GISE , Ecole Nationale de Ponts et Chaussées.

Résumé

Il s'agit de présenter une simulation des transferts de chaleur couplés dans le bâtiment basée sur la méthode zonale.

On montrera l'intérêt d'un tel type d'implémentation dans un environnement orienté objet et plus particulièrement de quelle façon il possible d'automatiser la génération des modèles et des données géométriques et physiques de façon à simplifier au maximum la tâche de l'utilisateur. L'objectif est de construire l'ensemble d'une simulation uniquement à partir d'une interface graphique.

On commencera par décrire la méthode zonale puis son implémentation dans un environnement orienté objet, et enfin l'automatisation de la génération des simulations.

I. Méthode zonale en environnement orienté objet :

L'approche moderne de la thermique du bâtiment passe par la simulation. A l'heure actuelle des codes de calcul à caractère monolithique existent, comme DOE-2 (Birdsall[1]), ESP (Clarke[2]), BLAST (Herron[3]) et autres, qui sont capables de simuler un bâtiment entier. Ces programmes, quoique puissants, ont certaines faiblesses liées à leur taille même: ils sont difficiles à utiliser, en raison du nombre considérable d'entrées et de langages de commande peu ergonomiques; difficiles à modifier, en particulier si l'on veut y introduire de nouvelles méthodes de calcul ou de nouveaux modèles de composants liés à de nouvelles technologies; enfin, ils sont difficiles à corriger en cas d'erreur, qu'il s'agisse d'erreurs dans le modèle équationnel, ou dans le programme chargé de mettre en oeuvre ce dernier.

C'est pourquoi l'approche modulaire a paru une alternative viable à ces programmes monolithiques. L'idée est d'établir une bibliothèque de modèles, et de fournir à l'utilisateur un environnement de simulation lui permettant de décrire les connexions entre modèles. L'environnement se charge alors de l'implémentation (par implémentation nous entendons le passage de la description d'un modèle à l'obtention d'un programme exécutable; l'implémentation comprend donc la traduction des modèles en spécifications algorithmiques pour la résolution numérique, puis l'écriture d'un programme d'ordinateur réalisant ces spécifications).

L'environnement souhaité doit donc être un langage de description, associé à un programme capable de traiter ce langage de description et d'en tirer une simulation valable. TRNSYS [4] a été un premier pas dans cette voie. Les objets (unités fonctionnelles élémentaires) de TRNSYS sont modulaires, mais ont néanmoins un sens prédéfini (c'est à dire leurs entrées sont fixées et leurs sorties aussi). Puis on a assisté à une floraison d'environnements basés objets appliqués à la thermique du bâtiment, comme SPARK, IDA

(Sahlin [5]), CLIM2000 (Rongere [6]) et autres. L'objet de ce travail est de présenter une approche de simulation aéraulique et thermique basée sur la « méthode zonale »', qui se prête parfaitement à une implémentation dans un environnement basé objet.

La façon la plus simple et la plus rapide de décrire le comportement thermique d'un bâtiment est de considérer un noeud d'air et d'effectuer un bilan de masse et d'énergie sur chaque zone. C'est une méthode souvent utilisée dans les codes de calcul globaux dans le bâtiment. Elle est rapide, mais imprécise. L'autre extrême consiste en l'utilisation de codes de modèles de champ, utilisant différences finies ou éléments finis pour la simulation. De tels codes sont précis, mais consommateurs en temps calcul, surtout dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle.

Une approche intermédiaire est offerte par les modèles dits zonaux. Ces modèles ont été proposés expérimentalement par C. Inard [7], et sont décrits par le même auteur dans les références [8] et [9], dans le cas d'une enceinte avec convecteur. Ils consistent en un partitionnement sommaire du domaine à étudier en zones, qui sont des sous-ensembles spatiaux, ici parallépipèdiques, où les variables d'état de l'air sont considérées comme uniformes, et qui reçoivent des débits massiques d'air et des flux d'énergie, à raison de un par face. En chacune de ces zones sont prises en compte des équations de bilan (masse et énergie) ainsi que l'équation d'état du fluide, ici la loi des gaz parfaits. Les chutes de pression sont calculées par l'approximation hydrostatique, valable aux faibles vitesses, et accessoirement pour des écoulements parallèles. Et les débits entre zones sont calculés par des lois phénoménologiques de la forme : $q_m = C\Delta P^n$, .
où ΔP est la différence de pression de part et d'autre de la frontière interzone, q_m le débit de masse interzone, C une constante empirique et n un exposant déterminé expérimentalement dont la valeur est habituellement comprise entre 0,5 (grandes ouvertures) et 1 (murs perméables). Les valeurs de C et n sont fixes (autant que la géométrie considérée) et tirées de la littérature.

Cette loi est locale. En raison de la chute de pression hydrostatique de part et d'autre de la zone et des masses volumiques différentes, ΔP n'est pas constant avec l'altitude entre deux zones adjacentes. A chaque interface interzone (c'est à dire la surface de contact entre deux zones de partitionnement) est donc aussi calculé le point neutre, qui est par définition le point où les pressions s'égalisent et où le débit de masse s'annule et change de sens. Deux débits de masse, de sens différents calculés par intégration sur la hauteur au dessus et en dessous du point neutre, sont donc considérés entre chaque paire de zones adjacentes; dans les cas où le point neutre est extérieur à la frontière entre zones, un seul débit de masse est à considérer.

La simulation d'un tel problème, non linéaire en raison des lois débit pression à exposant non égal à un, est, malgré sa simplicité, sujette à un certain nombre de difficultés d'implémentation (la résolution générale de systèmes non linéaires est malaisée) et de difficultés numériques (par exemple, en dimension 1, un exposant n=1/2 lance la méthode classique de Newton-Raphson dans une boucle infinie si aucun coefficient de relaxation n'est appliqué). Cependant sa présentation modulaire (zones de bilan et équations d'état, connectées par des frontières où sont calculés les débits de masse, le flux d'énergie interzone et la hauteur de point neutre), le rend passible d'un traitement par logiciel orienté objet, ce que nous présentons dans les paragraphes suivants.

II. Construction d'une simulation :

Le modèle qui va être décrit est conçu pour une utilisation du solver S.P.A.R.K (Simulation Problem Analysis and Research Kernel). S.P.A.R.K. est un environnement modulaire qui permet de résoudre d'importants systèmes d'équations non linéaires.
SPARK utilise la théorie des graphes afin de réduire la taille du système d'équations. Le système réduit obtenu est résolu par la méthode de Newton-Raphson et, après convergence, les inconnues restantes sont évaluées.

Comme TRNSYS, CLIM2000 et Allan Simulation, SPARK permet de construire des simulations complexes par la connexion de plus petits éléments, des objets (à un objet correspond une équation) ou macro-objets (sous-systèmes d'équations).

Les macro-objets utilisés dans notre modèle appartiennent à trois types de familles : les macro-objets interfaces, les macro-objets cellules et les macro-objets rayonnement.

Les cellules correspondent aux zones d'air lesquelles sont décrites différemment selon qu'elles se trouvent dans un écoulement particulier (jet ou panache) ou non. De manière générale, les cellules sont décrites par des équations de bilan et des équations d'état.

Entre deux cellules contiguës ou entre une cellule et l'extérieur, est placée une interface qui représente une séparation matérielle (paroi) ou non. Les interfaces sont les lieux de calcul des transferts thermiques et aérauliques.

A chaque enceinte correspond un macro-objet rayonnement lequel couple toutes les parois.

Avant de passer au détail des composants d'une simulation, les conventions de repérage géométrique des cellules et interfaces sont données.

1. Formalisme du découpage spatial :

Les cellules et interfaces ne sont pas repérées par des coordonnées géométriques mais par leur situation les unes par rapport aux autres.

On place au centre de chaque cellule un repère (O,OX,OY,OZ), OX est orienté du Sud vers le Nord, OY de l'Est vers l'Ouest, Oz du Bas vers le Haut. Les dimensions de la cellule « i » étudiée sont respectivement suivant ces directions, l, L et h.
En se basant sur ce repère, les cellules voisines et interfaces de séparation sont appelées cellule ou interface Sud, Nord, Est ...

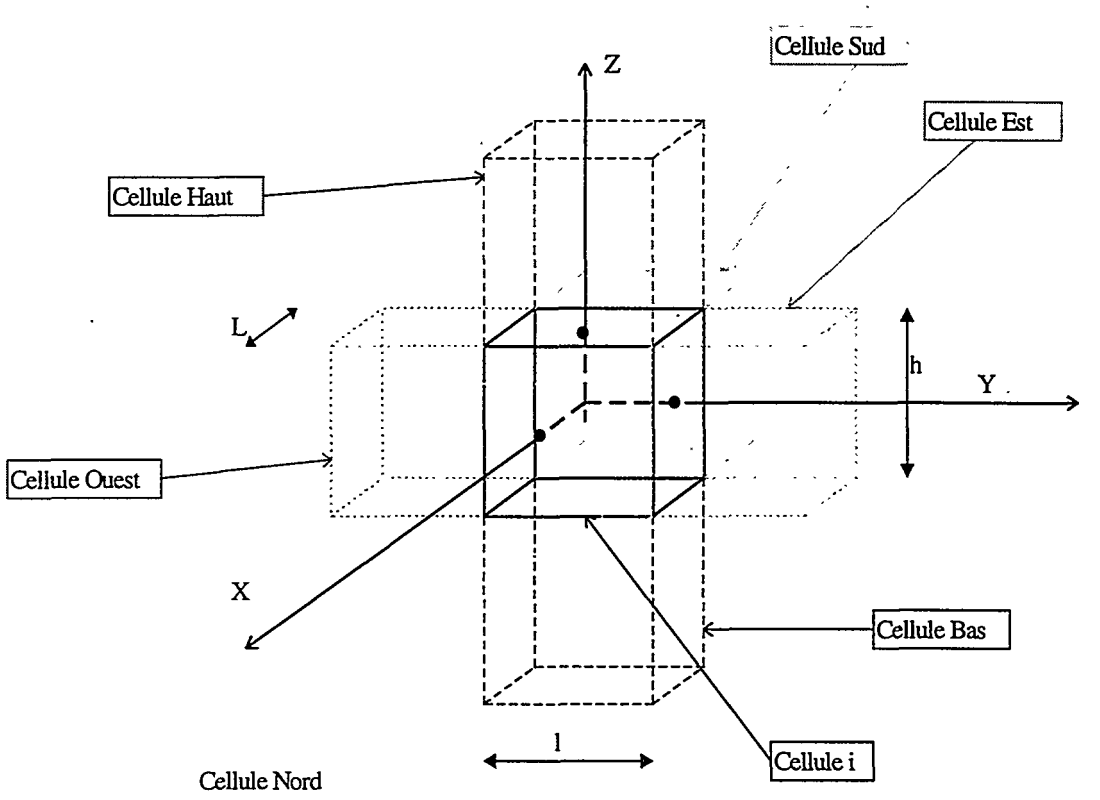


Figure 1 : Repérage spatial

2. Cellules courantes :

Une cellule courante est décrite par un système de trois équations (ou objets) qui sont un bilan de masse, un bilan d'énergie et une équation d'état.

Bilan de masse :

On part du principe qu'il ne peut y avoir de création de masse au sein d'une cellule et que l'air est un gaz incompressible. Soient Q_{mSud}, Q_{mNord}, Q_{mEst}, Q_{mOuest}, Q_{mBas} et Q_{mHaut}, les débits massiques algébriques échangés par la cellule « i » avec les cellules Sud, Nord, Est, Ouest...

On doit vérifier : $-Q_{mEst}+Q_{mOuest}-Q_{mNord}+Q_{mSud}-Q_{mHaut}+Q_{mBas}=0.$

Bilan d'énergie :

Par intégration de l'équation de conservation de l'énergie sur la cellule i le bilan suivant est obtenu :

$$\Phi_{i\to Est}-\Phi_{Ouest\to i}+\Phi_{i\to Nord}-\Phi_{Sud\to i}+\Phi_{i\to Haut}-\Phi_{Bas\to i}=\Phi_{isource}-C_p hlL\rho_i\frac{\partial T_i}{\partial t}.$$

Equation d'état :

On suppose que l'air est un gaz parfait, qu'il satisfait donc la relation $P = r\rho T$.

Schéma de principe de la macro Cellule:

Chaque cellule représente un volume d'air parallélépipèdique et doit être connecté aux six volumes voisins. Cette connexion se fait par l'intermédiaire des interfaces.

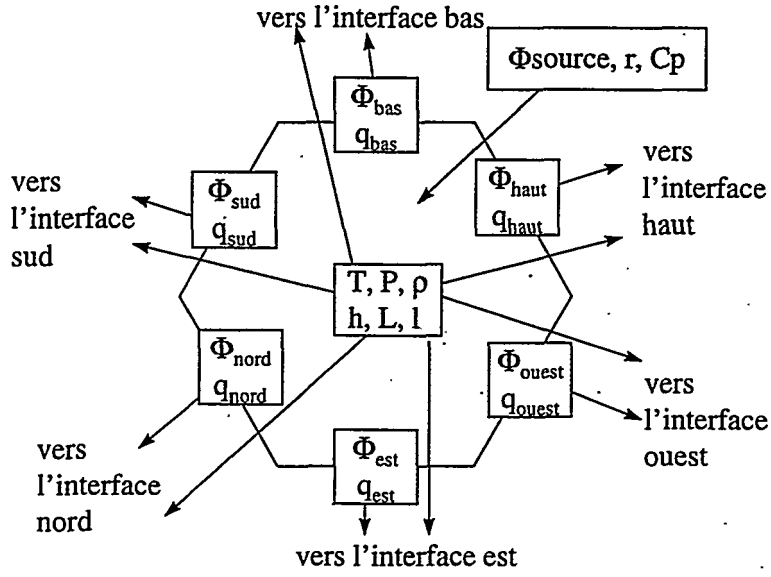


Figure 2 : Schéma de principe de la macro cellule.

Ce schéma indique que les variables T, P, ρ (température, pression et masse volumique au centre de la cellule) ainsi que les dimensions h, l et L sont connectées à toutes les interfaces voisines, c'est ce qu'on appelle des variables « pieuvre ». Les flux et débits (ϕ_{est}, ϕ_{ouest}, ...,q_{est}, q_{ouest},...) sont des variables orientées, connectées à une seule interface. Φ_{source}, r et C_p sont des entrées locales (Φ_{source}) ou globales (r, Cp).

3. Interfaces courantes (séparation deux cellules courantes ou ouverture) :

Echanges massiques :

La relation jusqu'alors utilisée pour évaluer les échanges massiques entre deux cellules contiguës est celle obtenue pour les débits à travers les grandes ouvertures (perte de charge singulière à travers un diaphragme) : $Q_m = \pm C\Delta P^{1/2}$, C étant en général pris égal à 0.83 [11].

Pour accélérer et faciliter la convergence des simulations, la fonction de calcul de débits a été linéarisée par morceaux et on constate (figure 3) que les écarts par rapport à la courbe théorique sont très faibles. De plus, vues les faibles variations de pression dans les écoulements du bâtiment, dans toutes les simulations testées, seule la partie centrale de la courbe a été utilisée ce qui évite tout problème numérique lié à la discontinuité de la dérivée de la fonction linéarisée.

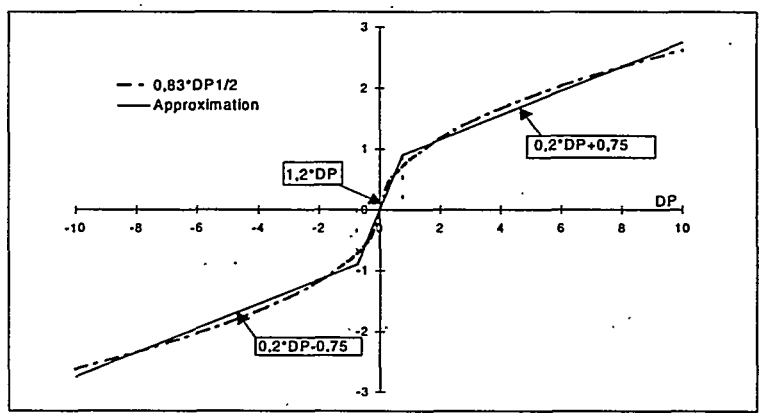


Figure 3: Linéarisation par morceaux de la fonction $0.83*\Delta P^n$.

Application aux écoulements dans les interfaces verticales:

On suppose que dans les cellules, la pression varie de façon hydrostatique.

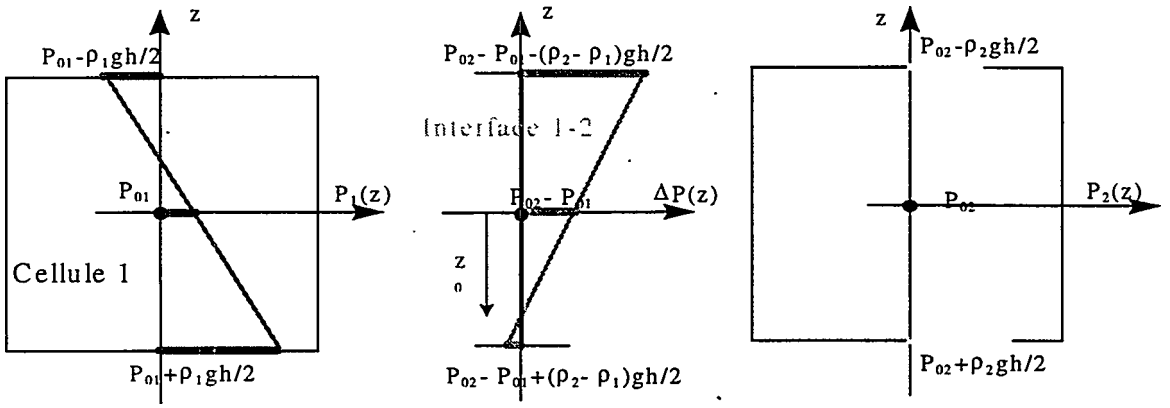


Figure 4 : Variation des pressions avec l'altitude.

La différence des pressions varie alors linéairement avec l'altitude et, éventuellement, s'annule en un point d'altitude z_0 $\left(Z_0 = \left(P_{02} - P_{01}\right) / g\left(\rho_2 - \rho_1\right)\right)$. En intégrant -C'ΔP (C' étant la nouvelle constante multiplicative, proche de 1.2) de part et d'autre de ce point, on accède aux débits positifs et négatifs (le débit positif correspond aux différences de pressions négatives).

Application aux écoulements dans les plans horizontaux :

Pour les frontières horizontales, on considère que les pressions sont constantes de part et d'autre, le débit est alors calculé directement par $Q = -C'\left(P_{02} - P_{01} + \frac{gh}{2}\left(\rho_2 - \rho_1\right)\right)$

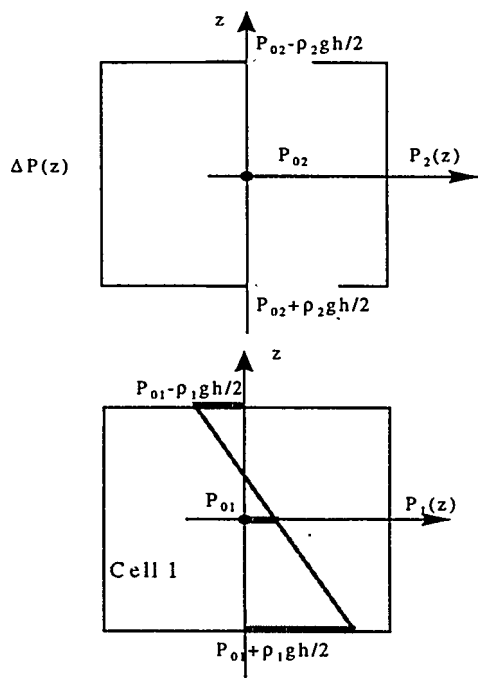


Figure 5 : Variation des pressions

Echanges d'énergie :

Le flux algébrique qui est transféré de la cellule i vers la cellule j est : $\Phi_{i\to j} = c_p\left(T_j Q_m^{+} + T_i Q_m^{-}\right) - \frac{2\lambda h L}{l_1 + l_2}\left(T_j - T_i\right)$.

Ce flux est constitué d'un flux enthalpique, $\Phi enth_{i\to j} = C_p\left(T_j Q_m^{+} + T_i Q_m^{-}\right)$ et d'un flux de conduction dans l'air, $\Phi cond_{i\to j} = -\frac{2\lambda hL}{l_1 + l_2}\left(T_j - T_i\right)$. Dans le cas d'échanges massiques importants, le flux de conduction sera négligeable devant le flux enthalpique.

Schéma de principe des macros interfaces courantes :

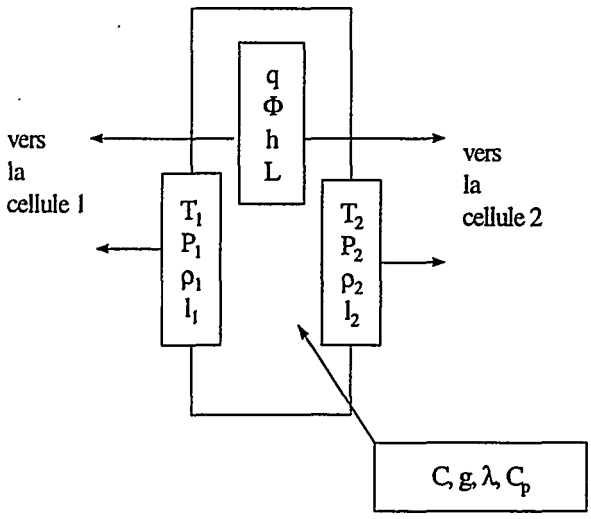


Figure 6 : Interface verticale.

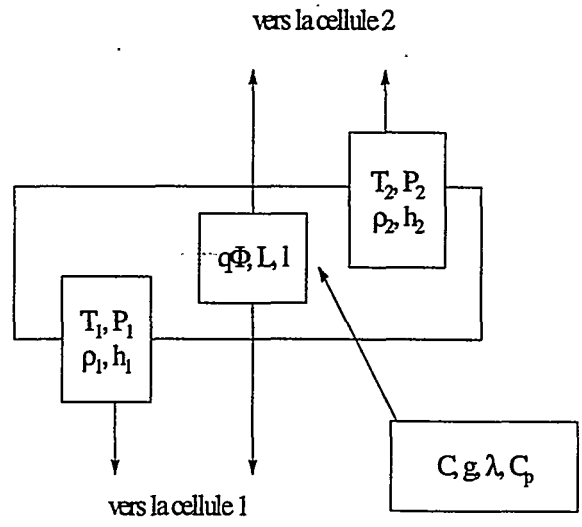


Figure 7 : Interface horizontale.

Ce schéma indique que les variables q, Φ (débit et flux de chaleur traversant l'interface) ainsi que les dimensions h, L (ou l, L) sont des variables pieuvre (connectées à toutes les cellules voisines). Les pressions, températures et masses volumiques P_1, P_2, T_1, T_2, ρ_1 et ρ_2 ainsi que les dimensions l_1 et l_2 (ou h_1 et h_2) sont des variables orientées (connectées à une seule cellule). C, g, λ et C_p sont des entrées locales (C) ou globales (g, λ, Cp).

4. Interfaces de Parois :

Bilan de flux à la surface de la paroi :

Pour les surfaces de part et d'autre de la paroi, on écrit un bilan de flux mettant en jeu le flux convectif, les flux radiatifs arrivant sur la surface et le flux conductif transmis vers l'intérieur de la paroi.

Les flux de convection et conductifs sont calculés dans la *macro paroi* tandis que les flux de rayonnement le sont dans une macro de rayonnement qui évalue les flux de rayonnement de toute la pièce.

$$\varphi_{cond} = \varphi_{ray_CLO} + \varphi_{ray_GLO} + \varphi_{conv}$$

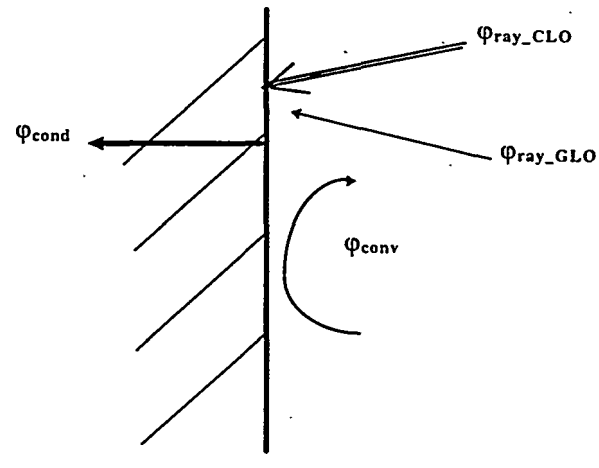


Figure 8. Bilan des échanges surfaciques

Echanges conductifs dans les parois :

Dans un premier temps, il est considéré que les transferts de chaleur dans la paroi ne se produisent que dans la direction perpendiculaire à la surface. Ceux-ci sont calculés par la méthode des différences finies.

Il est prévu de considérer qu'il y a non seulement conduction dans la direction perpendiculaire aux surfaces de la paroi mais aussi parallèlement à celles-ci. En effet plusieurs facettes d'une même paroi peuvent avoir des températures de surface très différentes par exemple quand il y a une tache solaire ; la conduction parallèlement à la surface pourrait alors ne pas être négligeable.

Echanges convectifs air/parois :

Les flux convectifs sont calculés à partir de la relation $\Phi = S.h_{conv}(T_1 - T_2)$ (flux orienté de la paroi vers la cellule), T_1 est la température de la surface de la paroi, T_2 la température de l'air dans la cellule voisine. En théorie, h_{conv} dépend du type d'écoulement qui a lieu au voisinage de la paroi :

- Convection naturelle : $h_{conv} = a\Delta T^n + b$,

ΔT étant la différence de température entre la surface considérée et l'air, a, b et n dépendent du type de surface et de la nature du milieu ambiant (en l'occurrence, l'air).

- Convection forcée : $h_{conv} = K.v^{1/2}$,

v est la vitesse de l'air incident, parallèlement à la surface, K dépend du type de surface et de la nature du milieu ambiant. .

Dans un premier temps, on considère h_{conv} comme constant.

Schéma de principe des interfaces paroi :

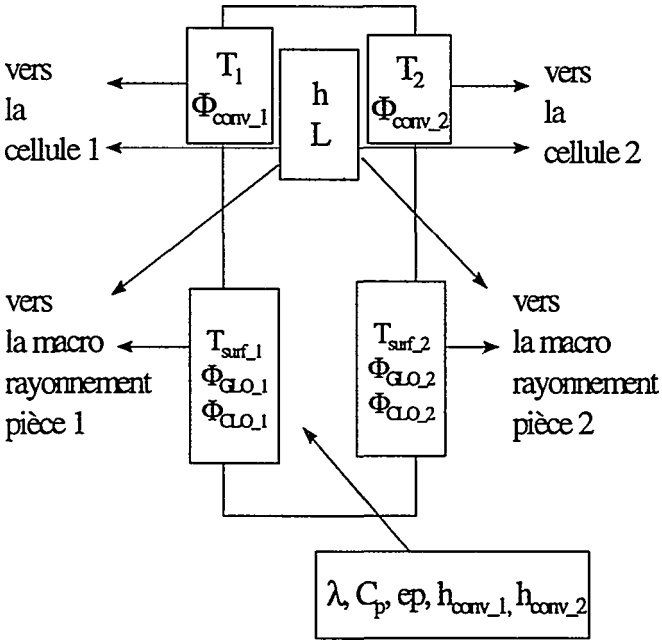


Figure 9 : Schéma de principe d'une interface de paroi.

5. Prise en compte du rayonnement :

Le calcul des flux de rayonnement passe par le couplage de toutes les parois qui appartiennent à une même enceinte. Il y a donc une *macro rayonnement* par pièce, reliée à toutes les *interfaces paroi* de la pièce.

Cette macro doit être générée automatiquement en fonction du maillage qui conditionne le nombre de surfaces élémentaires. Cette création se fait en même temps que celle de la simulation.

Echanges radiatifs de grandes longueurs d'onde :

Pour représenter les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde, plusieurs possibilités s'offrent à nous, la méthode de l'enceinte fictive, le calcul des facteurs de forme exact ou au prorata des surfaces puis méthode des radiosités.

Le calcul des facteurs de forme exact aurait été simple en théorie puisque les surfaces considérées sont perpendiculaires ou parallèles mais de mise en pratique incohérente avec notre modèle de type objet qui ne dispose pas de repérage géométrique global. De plus, les facteurs de forme ayant été calculés au prorata des surfaces ou exactement, pour n surfaces, la méthode des radiosités nécessite un nombre de calculs de l'ordre de n^2 alors que la méthode de l'enceinte fictive n'en requiert que n. C'est donc la méthode de l'enceinte fictive (avec redistribution du flux résiduel) qui a été choisie.

Echanges radiatifs de courtes longueurs d'onde :

Les échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde sont également traités par la méthode de l'enceinte fictive.

Schéma de principe de la macro rayonnement :

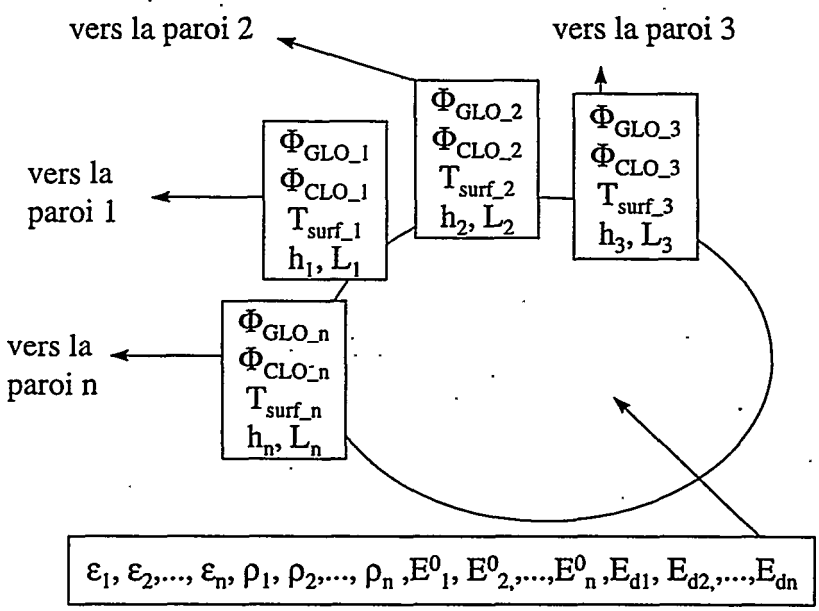


Figure 10 : Schéma de principe de la macro rayonnement.

6. Traitement des écoulements particuliers :

Les premiers résultats montrent que les écoulements particuliers ne sont pas bien représentés par un modèle constitué uniquement de cellules et interfaces courantes comme celles décrites plus haut, d'où la nécessité de créer des zones et interfaces particulières pour représenter et délimiter les écoulements particuliers tels que les jets et panaches.

La configuration étudiée est une pièce divisée en 64 zones de largeur et de longueur 1 mètre, leur hauteur étant 50 centimètres pour les zones supérieures et inférieures et 1 mètre pour les autres (figure 11). L'air extérieur pénètre dans la pièce à une température de 300 Kelvin qui est aussi la température imposée à la surface extérieure des parois. La pièce contient dans un même plan vertical une source de chaleur de 300W et deux parois perméables.

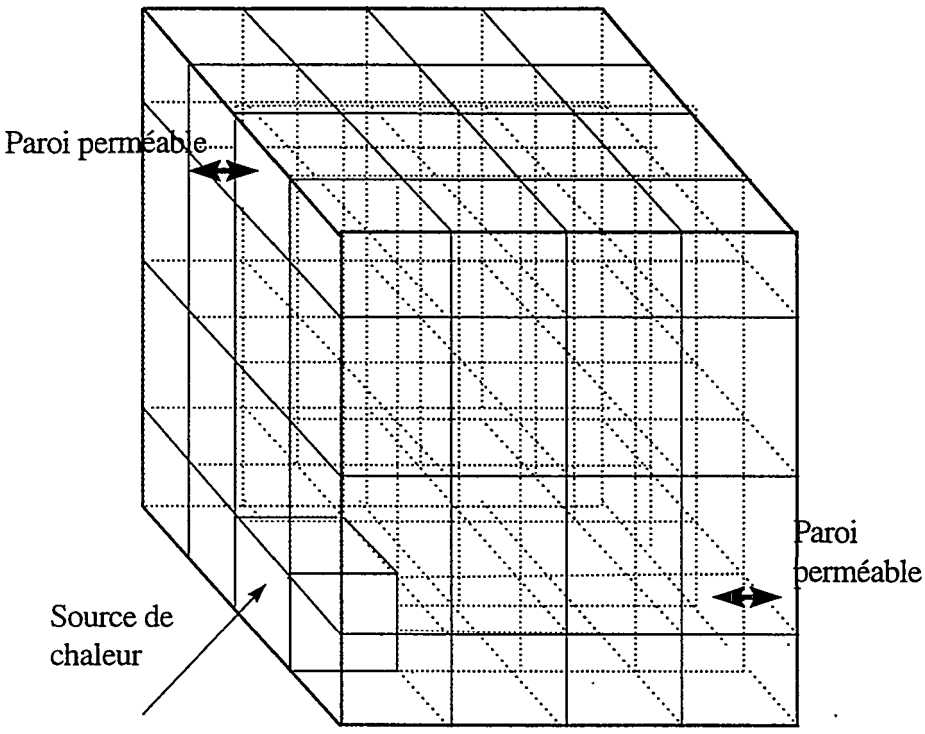


Figure 11 : Configuration étudiée.

La figure 12 donne les résultats en débits et température obtenus dans le plan contenant la source de chaleur, l'entrée et la sortie d'air. On constate que, excepté juste au dessus de la source, l'écoulement induit n'entraîne pas l'air environnant.

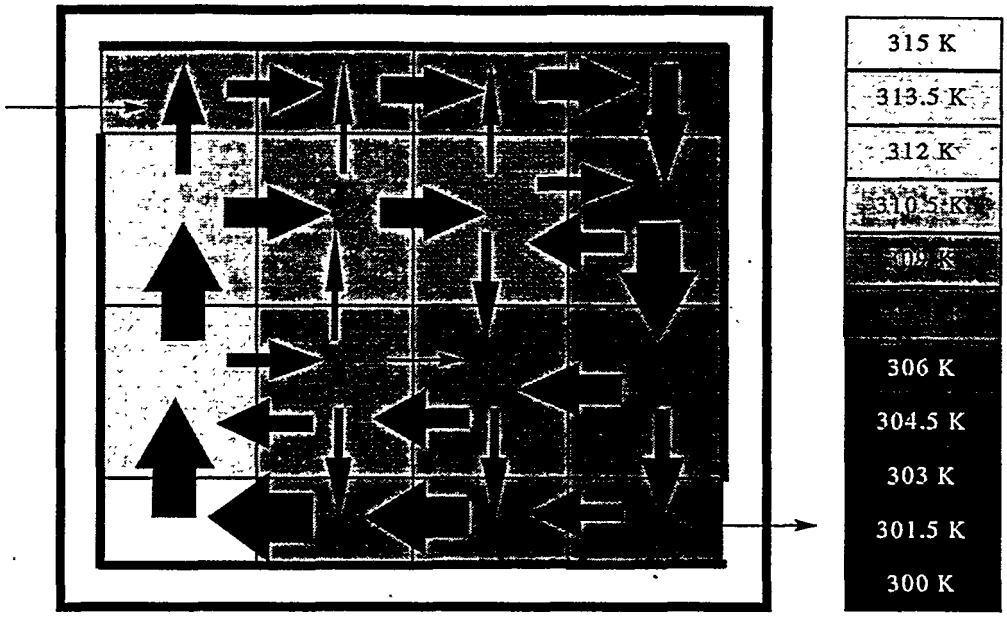


Figure 12 : Résultats.

Panaches :

Un panache est représenté par deux types de cellules, le premier modélisant l'émetteur, le second, les zones de panache. Plusieurs interfaces sont également créées, comme décrit dans l'exemple 2D suivant (figure 13). Ces cellules et interfaces dépendent du type d'émetteur.

Dans le partitionnement, on utilise une largeur de panache constante, l'évolution de la largeur du panache avec l'altitude sera prise en compte dans le calcul des débits verticaux dans le panache.

Le détail des macros donné par la suite correspond à une première modélisation en 2 dimensions d'un panache issu d'un convecteur électrique à sortie supérieure, seule configuration développée pour le moment.

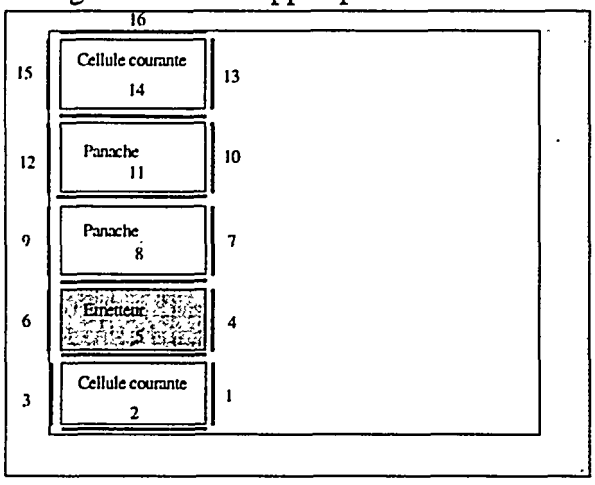


Figure 13 : Modélisation d'un panache issu d'un convecteur électrique.

Interface 4 : surface frontale de l'émetteur,
interface 5 : interface dessous émetteur,
interface 6 : surface arrière l'émetteur/paroi,
interfaces 7, 10 : interfaces frontales de panache,
interfaces 8, 10, 14 : interfaces horizontales de panache,
interfaces 9, 12 : interfaces arrières panache/paroi,
Les interfaces 1,2,3,13,15 et 16 sont traitées comme des interfaces courantes et interfaces de paroi.

Cellule émetteur :

La cellule qui représente l'émetteur est constituée des bilans de masse et d'énergie, comme les cellules courantes, et de 2 équations qui correspondent au calcul de la température de la surface frontale de l'émetteur et de celle de l'air à la sortie de l'émetteur [12].

Surface frontale de l'émetteur :

Cette interface contient le calcul du flux transmis qui ici se résume à la somme du flux de convection et des flux de rayonnement étant donné que le débit traversant cette surface est considéré comme nul.

Interface dessous de l'émetteur:

On suppose que cette interface est la seule par laquelle l'air entre dans l'émetteur. Pourtant, il n'est pas nécessaire de calculer le débit transmis puisque le bilan effectué dans la cellule émetteur ne contient que deux débits non nuls (débit entrant en surface inférieure et débit sortant en surface supérieure) et le débit sortant sera calculé dans l'interface supérieure, traitée comme une interface horizontale de panache.
Le calcul du flux transmis est identique à celui d'une interface horizontale courante.

Surface arrière émetteur/paroi :

On considère que l'émetteur est directement en contact avec la paroi qui est son support. L'interface à l'arrière de l'émetteur est donc une interface de paroi pour laquelle on ne calcule ni flux de convection ni flux de rayonnement, le flux arrivant sur la surface est directement évalué à partir du bilan de flux effectué dans la cellule émetteur.

Cellule de panache :

Toute cellule de panache regroupe les équations de bilan de masse et d'énergie et l'équation de calcul de la température moyenne de l'air dans la cellule [12].

Interface frontale de panache :

Dans les interfaces frontales de panache, le flux transmis est évalué comme dans les interfaces verticales courantes. Le débit n'est pas calculé ici, il sera obtenu dans l'équation de bilan de masse de la cellule de panache voisine.

Interface horizontale de panache :

Le débit transmis est évalué en prenant en compte un profil de vitesse de type gaussien [12]. Le flux est calculé comme dans une interface horizontale courante.

Interface arrière panache/paroi :

Le flux de convection d'une interface de paroi classique est remplacé par une relation qui prend en compte d'adhérence du panache à la paroi [12].

Passage en régime dynamique :

Pour pouvoir être utilisées dans des simulations en régime dynamique, ces cellules et interfaces devront pouvoir fonctionner successivement en cellules et interfaces courantes ou en cellules et interfaces d'écoulement particulier selon que la puissance injectée dans l'émetteur est suffisante ou non pour créer le panache.

III. Génération automatique des simulations :

Les objets et macro-objets sont automatiquement créés à partir des équations écrites symboliquement dans MAPLE.
Ce travail a été fait pour toutes les macros cellules et interfaces présentées plus haut, ce qui constitue une bibliothèque d'objets.

Une fois les différents types de cellules et interfaces disponibles, la difficulté de construction de la simulation réside dans le choix du partitionnement du local, ou groupe de locaux, le choix des cellules et interfaces à implémenter dans ce partitionnement et leur connexion. Ces délicates interventions, qui jusqu'à présent étaient laissées au soin de l'utilisateur sont en cours d'automatisation.

Le but de cette automatisation est que l'utilisateur n'ait plus qu'à donner les conditions aux limites du problème, les étapes suivantes étant menées comme indiqué dans la figure 14.

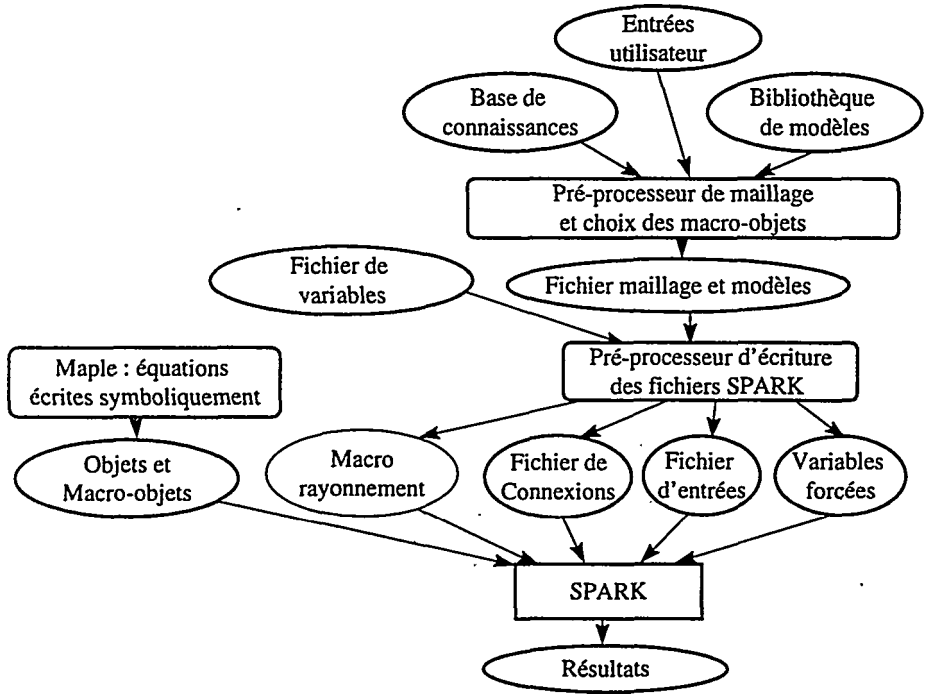


Figure 14 : Déroulement d'une simulation

1. Génération automatique du maillage et implémentation des modèles :

Les tentatives de généralisation des modèles zonaux (Bouia[13]),(Wurtz[14]) pour une meilleure réutisabilité montrent qu'on n'a pas pu s'affranchir complètement de l'expertise physique de l'utilisateur. En effet, les écoulements directifs comme les couches limites, les jets ou les panaches sont encore mal représentés par les modèles semi-empiriques qui se veulent généraux (Rodriguez[15]),(Wurtz[14]) si bien qu'on est obligé de réaliser un partitionnement qui respecte la physique de l'écoulement (ie. la construction de zones de jet, de couche limite ou de panache, par exemple) et d'assurer le raccordement des modèles appropriés à chaque zone. Or, actuellement, le partitionnement et le raccordement des modèles se font « à la main' » (Inard[16]). Il reste donc un important travail d'automatisation qui rende ces modèles

adaptables aux diverses configurations en minimisant l'intervention du concepteur. Pour cela, on fait naturellement appel aux techniques de l'intelligence artificielle. Il s'agit d'élaborer un outil d'aide à la conception de modèles qui rassemble les connaissances sur les diverses structures d'écoulements rencontrées dans le bâtiment aussi bien du point de vue qualitatif que de la modélisation et qui organise ses connaissances pour obtenir une description de l'écoulement global par zones interagissant entre elles. L'outil a quatre fonctions :

- Il doit identifier les écoulements élémentaires grâce à des règles qualitatives basées sur les conditions aux limites dynamiques et thermiques du domaine étudié.
- Une fois les écoulements élémentaires spécifiés, il crée une zone qui délimite le lieu où l'écoulement élémentaire reste de même nature ie. le domaine de validité du modèle à choisir à l'étape suivante.
- Ainsi, il choisit le modèle le plus approprié dans une bibliothèque et le résout complètement si possible. Les modèles sont analytiques. Les modèles peuvent dériver directement de la formulation mathématique de la physique de l'écoulement et être résolus formellement par des méthodes analytiques exactes ou approchées. C'est le cas des couches limites dont le modèle équationnel est résolu par la méthode des similitudes ou par la méthode intégrale de Karmán-Pohlhausen. Les modèles peuvent également être issus des études expérimentales ou de simples corrélations empiriques provenant aussi bien de l'expérience que des calculs numériques. C'est le cas des jets ou des panaches.
- Enfin, l'outil doit assurer le raccordement entre chacune des zones en satisfaisant la continuité des transferts de masse et d'énergie.

La structure de l'outil découle de ses fonctions. Il est composé de trois parties (figure 15) :

- la base de connaissance elle-même composée de la base de faits et de la base de règles,
- la bibliothèque de modèles élémentaires,
- le moteur qualitatif chargé d'exploiter la base de connaissance et d'appeler à bon escient les modèles élémentaires.

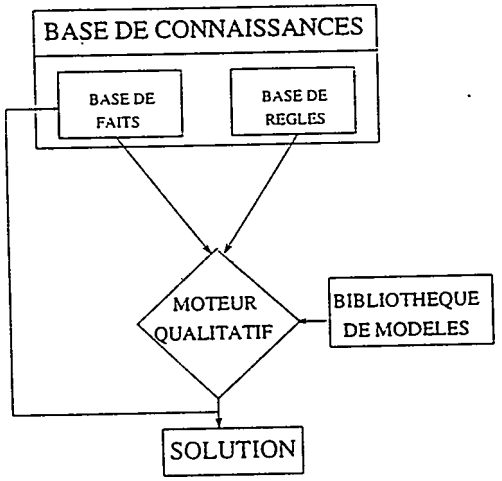


Figure 15 : Structure schématique du Générateur Automatique de Modèles Elémentaires.

La base de faits contient les descripteurs géométriques. En effet, pour traiter une géométrie bidimensionnelle, on considère que celle-ci peut être représentée par une liste de segments de droite délimités par deux points et auxquels sont associées des conditions dynamiques et thermiques. Chaque zone est assimilée à un polygone. On distingue

simplement par une chaîne de caractères les segments qui décrivent les frontières extérieures du domaine à savoir les murs et les segments qui décrivent les frontières intérieures délimitant les zones. Ainsi, un mur vertical isotherme de 2.5 m de hauteur est décrit par le segment appelé MUR:

MUR:=[[0.,0.],[0.,2.5],[[u(0,y)=0,v(0,y)=0],[T(0,y)=291]],`mur`];

La base de règles contient un groupe de règles qui détermine le moteur de l'écoulement et en déduit le type d'écoulement élémentaire associé, un groupe qui crée les frontières correspondant au type d'écoulement élémentaire et un groupe chargé d'attribuer le modèle approprié. Le moteur qualitatif utilise alors ces faits et ces règles. Par exemple, une arrivée d'air est caractérisée par un débit à travers un segment donné ou une vitesse non nuls. Une reconnaissance de caractères permet d'identifier la condition en débit ou en vitesse et un test choisit un mot prédéfini désignant l'arrivée d'air. A partir de ce mot, une série de tests permettent de spécifier la nature de l'écoulement élémentaire induit par la présence de l'arrivée d'air à savoir un jet. Si, par exemple, cette arrivée d'air se trouve près d'une paroi, si la température du jet est égale à la température de la paroi, si l'angle d'injection est nul par rapport à l'horizontale, on estime la portée du jet, notée, Dp, et on obtient la liste de mots suivante :

[`JET,PAROI,ISOTHERME,HORIZONTAL,Dp=2.5`]

Utilisant l'information contenue dans ces mots, le moteur qualitatif construit les frontières de la zone de jet et lui attribue le modèle choisi dans la bibliothèque.

Avant de détailler le processus général du partitionnement, quelques précisions sur les modèles :

Chaque modèle est implémenté de telle sorte qu'il prenne en entrée la liste de descripteurs géométriques avec leurs conditions aux limites et donne en sortie la solution analytique locale, les nouvelles conditions aux limites inhérentes au modèle utilisé et la valeur des flux de masse ϕ_m et des flux de chaleur ϕ_c à travers chaque frontière de la zone où le modèle est valable (figure 16).

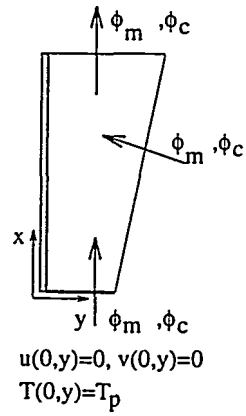


Figure 16 : Schématisation de la zone de jet de paroi.

A présent, on se propose de suivre le déroulement de la première itération du processus de partitionnement du domaine.

Après avoir identifié les moteurs de l'écoulement suite à la présence d'entrées et de reprises d'air, de sources de chaleur, de murs chauds ou froids, le code en déduit la nature des écoulements élémentaires, construit la zone associée et résout localement le modèle approprié. Une fois ces différentes étapes franchies, les zones connues sont séparées de la zone inconnue qu'il reste à analyser. Les conditions aux limites sur la zone inconnue sont mises à jours : elles dérivent directement de la solution analytique des zones connues adjacentes.

Le même processus est alors appliqué à la zone inconnue et ce, jusqu'à ce que le domaine soit complètement décrit par l'ensemble des zones connues. Dans les zones courantes qui ne sont ni des couches limites, ni des jets, ni des panaches, ni des zones de stratification thermique on peut alors recourir aux modèles semi-empiriques plus généraux basés sur une loi en débit-pression. Ainsi, on est sûr de pouvoir décrire complètement le domaine.

Pour l'instant, le code ne gère pas encore les situations de conflit si plusieurs moteurs d'écoulements coexistent. Le but est, à terme, de trouver des critères basés sur l'analyse dimensionnelle par exemple, afin de dégager, si possible, quel est le moteur dominant.

C'est pourquoi, la structure de l'outil est modulaire ce qui permettra ultérieurement d'enrichir sans trop de bouleversements et la base de connaissance en ajoutant de nouvelles règles, et la bibliothèque avec d'autres modèles.

Le code est écrit dans le langage propre à Maple V (Char[17]), logiciel de calcul formel qui offre d'importantes possibilités de calculs analytiques, de manipulations d'expressions formelles et d'outils de description géométrique.

Une illustration de cette démarche d'automatisation a été réalisée sur le problème classique de la cavité différentiellement chauffée en deux dimensions (Gagneau[18]).

Les principales difficultés de ce travail d'automatisation peuvent s'énoncer en trois points:

- une bonne spécification et une bonne structuration du problème par un ensemble de règles qualitatives élémentaires,
- le rassemblement des modèles analytiques,
- la gestion des situations conflictuelles entre divers phénomènes physiques.

1. Génération automatique du fichier de connexion des macro-objets et de la macro rayonnement.

Une fois le maillage et le choix des cellules et interfaces à implémenter déterminés, il ne reste plus qu'à créer les fichiers propres à la simulation qui sont :

- la macro rayonnement (ou les macros rayonnement s'il y a plusieurs enceintes),
- un fichier de connexions dans lequel toutes les macros sont déclarées autant de fois qu'elles sont utilisées, toutes les variables et entrées du problème sont déclarées et reliées aux macros qui les utilisent ,
- un fichier d'entrées,
- un fichier dans lequel figurent les variables à forcer (celles qui doivent obligatoirement figurer dans le système d'équations réduit)
- un fichier d'entrées dynamiques si nécessaire.

Le formalisme strict des fichiers utilisés par SPARK en facilite l'écriture.
Par exemple tout fichier de connexion débute par la déclaration des macros utilisées autant de fois qu'elles le sont, puis celles des variables et le nom qu'elles prennent dans les différentes macros.

La création de ces fichiers est l'objet d'une automatisation qui a pour point de départ la lecture de deux fichiers.

Le premier, issu de l'étape précédente (génération du partitionnement) contient les caractéristiques du maillage (nombre de cellules dans les trois directions et leurs dimensions) et le type de chaque interface et de chaque cellule.

Le second, permanent (réactualisé à chaque ajout de nouveaux modèles), consiste en un classement des variables et entrées de toute les macros disponibles.
Il indique par exemple :

- les variables pieuvre, à partir des cellules courantes comme P, ρ et T,
- celles qui le sont à partir des interfaces courantes comme q et Φ,
- les variables locales des interfaces,
- les entées globales des cellules courantes comme r,
- celles qui appartiennent aux cellules et aux interfaces courantes comme Cp(air)
- les entrées locales des parois (caractéristiques des matériaux),
- ...

C'est en fait la traduction des schémas de principe donnés lors de la description des macros.

La génération repose également sur une définition rigoureuse et cohérente des noms des variables dans les macro-objets, ainsi, on peut établir des règles de connexion.
Par exemple les variables P, T et ρ (variables pieuvre qui doivent être reliées aux six interfaces frontalières) d'une cellule seront appelées P_1, T_1 et ρ_1 dans les interfaces ouest, nord et haut (interfaces en aval de la cellule) et P_2, T_2 et ρ_2 dans les interfaces est, sud et bas (interfaces en amont de la cellule).

Conclusion et perspectives :

Le principe de la méthode zonale consiste à découper un local en sous-volumes en fonction des écoulements élémentaires identifiés.
Jusqu'à présent, sa mise en œuvre était difficile parce qu'elle nécessitait de très bonnes connaissances en thermique et en aéraulique de la part de l'utilisateur pour la réalisation du découpage et le choix des modèles. D'où la nécessité de rendre cette phase d'expertise automatique.

Par ailleurs, le caractère modulaire de la méthode zonale rend naturelle et presque obligatoire l'utilisation d'un environnement orienté objet tel que SPARK.

Il paraît maintenant intéressant et réalisable de construire un outil global d'automatisation pour la simulation des phénomènes thermiques et aérauliques dans un bâtiment. Les éléments de la structure de cet outil sont d'ores et déjà place, il reste à les relier. L'enrichissement de la base de connaissance et de la bibliothèque de modèles est en cours. La phase de validation sera envisageable dés que suffisamment de modèles seront disponibles pour traiter des cas réels.

Références :

[1] B. Birdsall, W.F. Buhl K.L. Ellington, A.E. Erdem et F.C. Winkelmann
Overview of the DOE-2 building energy analysis program, Version 2.1, D. Lawrence Berkeley Laboratory, Report LBL 19735, Février 1990.

[2] J.A. Clarke , W.M. Dempster et C Negrao
The implementation of computational fluid dynamics algorithm within the esp-r system. Proceedings de Buliding Simulation'95, Madison U.S.A. International Building Performance Simulation Association, Août 1995.

[3] D. Herron, G.N Walton L. Lawrie
Building loads analysis and system thermodynamics (BLAST) program user's manual. Volume 1 supplément (version 3.1), Mars 1981.

[4] TRNSYS
A Transient Simulation Program, Solar Energy Laboratiry, University of Winsconsin-Madison, Avril 1984.

[5] P. Sahlin
A modelling and simulation environment for building applications. ITM report 1991 :2. Swedish Institute of Applied Mathematics, Décembre 1991.

[6] F.X. Rongère, D. Bonneau, D. Covalet et B Gautier
Clim 2000 : un logiciel modulaire pour l'élaboration de modèles thermiques pour l'habitat, Revue Générale de thermique, nov-dec 1989.

[7] C. Inard
Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Juillet 1988.

[8] C. Inard, D. Buty
Simulation of thermal coupling between a radiator and a room with zonal models. Proceedings de Building Simulation'91, Août 1991.

[9] C. Inard, N. Molle et F. Allard
Etude du couplage thermique entre des corps de chauffe et un local, Revue Générale de Thermique, Mars 1991.

[10] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky et W.T. Vetterling
Numerical recipes, Cambridge UniversityPress, 1986.

[11] R. Fauconnier, A. Grelat et P. Guillemard
Eléments d'analyse du régime dynamique en thermique du bâtiment. Rapport technique, Fédération Nationale du Bâtiment, Saint Rémy Les Chevreuses, 1989.

[12] P. Barles, P. Dalicieux, C. Inard
Le panache des convecteurs électriques, Société Française des Thermiciens, journée d'étude du 2 Février 1994 sur la Thermoaéraulique des Transferts Couplés Emetteurs de Chaleur-Bâtiments.

[13] H Bouia
Modélisation simplifiée d'écoulements de convection mixte interne : Application aux échanges thermo-aérauliques dans les locaux. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Mars 1993.

[14] E. Wurtz
Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 1995.

[15] E.A. Rodriguez, S. Alvarez et I. Caceres
Prediction of indoor temperature and air flow patterns by means of simplified zonal models. Proceeding de ISES Solar World Congress, Budapest, Hongrie, 1993.

[16] C.Inard, P. Depecker et J.J. Roux
Un modèle simplifié pour la prédiction du champ de température dans les bâtiments. Revue Générale de Thermique n°36 pp 113-123, 1997.

[17] B.W. Char, K.O. Geddes et G.H. Gonnet
MAPLE User's Guide. WATCOM Publications, Ltd., Waterloo, Ontario, Canada, 1985.

[18] S. Gagneau , J.M. Nataf et E. Wurtz
An illustration of automatic generation of zonal models. IBPSA, Building Simulation'97, Prague, République Tchèque. J.D. Spitler, J.L.M. Hensen, Août 1997.