

## MODELES ZONaux ET GRAND VOLUMES

C. Inard  
 Centre de Thermique  
 INSA Lyon  
 Bât. 307  
 20, av. Albert Einstein  
 69621 Villeurbanne  
 FRANCE

D. Buty  
 CSTB  
 84, av. Jean Jaurès  
 B.P. 02  
 Champs/Marne  
 77421 Marne la Vallée Cedex2  
 FRANCE

## INTRODUCTION

L'objectif de ce papier est double :

- d'une part de démontrer l'applicabilité des modèles zonaux pour l'estimation du profil de température dans une pièce chauffée par un radiateur.

Pour cela, nous allons décrire deux modèles zonaux développés actuellement au CSTB et à l'INSA de Lyon. Ces modèles ont fait l'objet d'une participation commune aux travaux de l'Annexe 20 de l'Agence Internationale de l'Energie. Le principe de base de ces modèles est de diviser le domaine de calcul en plusieurs zones et de calculer les transferts de masse et de chaleur se produisant entre ces différentes zones de l'écoulement. La division en zones se fait selon une connaissance préalable de l'écoulement d'air se produisant à l'intérieur du domaine de calcul considéré. Pour cela, ainsi que pour certaines des corrélations quantifiant les échanges entre zones, il est fait appel à des résultats expérimentaux.

Les deux modèles seront décrits, une première validation sera faite en comparant avec des résultats de mesure à l'échelle 1, enfin ces modèles seront confrontés à un modèle d'ordre supérieur sur un des cas tests définis dans le cadre de l'Annexe 20 de l'AIE.

- La deuxième partie traitera du programme de recherche qui a été engagé au cours du second semestre 1988 par le CSTB en vue d'améliorer les connaissances sur les champs de température dans les locaux de grande hauteur.

Les études récentes ont essentiellement concerné des expérimentations menées dans des locaux réels dont nous analyserons les mesures, l'étude du comportement des jets anisothermes dont nous présenterons les premiers résultats. Enfin l'applicabilité des modèles zonaux pour traiter ce type de problèmes sera étudiée.

## SIMULATION DU COUPLAGE THERMIQUE ENTRE UN RADIATEUR ET UNE PIECE A L'AIDE DE MODELES ZONaux

Les premières études sur les modèles zonaux sont dues à Lebrun [1], Laret [2], et Ngendakumana [3]. Ce type d'approche a été par la suite repris par Hutter [4] pour l'étude des galeries couvertes.

La division arbitraire du volume intérieur en zones élémentaires requiert tout d'abord une connaissance de l'aspect de l'écoulement que l'on se propose de modéliser. Néanmoins, l'écriture des équations de conservation de la masse et de l'énergie ne suffit pas à assurer la fermeture du système d'équations. C'est pour cela que l'on fait appel à des corrélations expérimentales.

## Modèle à deux zones

Ce modèle est basé sur les travaux de A.T. Howarth décrits dans sa thèse [5]. L'objectif est d'évaluer le profil de température dans une pièce chauffée par un radiateur par un modèle simple, ce qui implique des hypothèses ainsi que des informations sur les mouvements convectifs ainsi que sur les transferts de chaleur intervenant dans la pièce.

Les hypothèses sont les suivantes :

- le radiateur est placé en allège de la fenêtre. Le panache induit par cette source de chaleur s'élève le long de la fenêtre avec laquelle il échange de la chaleur, puis il forme une couche d'air chaud en dessous du plafond
- a cause de la différence de température entre les murs et le centre de la pièce, se développent le long des murs des couches limite verticales descendantes dont le flux massique équilibre le panache ascendant du au radiateur.
- au centre de la pièce, on supposera que le champ de température ne dépend que de la coordonnée verticale.

Le modèle détermine un profil stationnaire de température défini par deux température, une située juste au dessus du plancher et l'autre située juste en dessous du plafond. La pièce est donc divisée en deux zones séparées par un plan neutre qui est défini comme étant le plan au travers duquel le débit volumique vertical net est nul. La figure 1 illustre la division en deux zones.

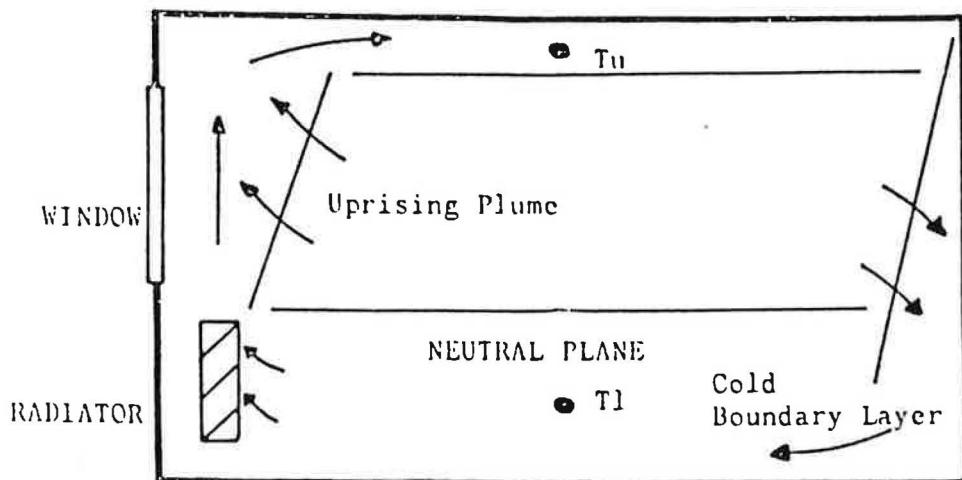


Figure 1 Schéma des écoulements pour le modèle à deux zones

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- les dimensions de la pièce
- les températures de surface des murs, du plafond et du plancher
- soit la température de surface de l'émetteur, soit une température de consigne de la pièce

Du fait de la dépendance des flux de chaleur par rapport aux températures des deux zones, la résolution s'effectue de manière itérative. Les trois étapes de résolution décrites ci-dessous sont répétées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte:

Etape 1 : échange de chaleur entre le radiateur et la pièce

Les caractéristiques de l'émetteur et du panache sont déterminées expérimentalement. La température de surface du radiateur est estimée en écrivant l'équation d'équilibre entre le flux convectif issu du radiateur et les déperditions thermiques le long du vitrage et des parois de la pièce.

### Etape 2 : position du plan neutre

Le plan neutre est le plan horizontal au travers duquel le flux volumique ascendant du panache est égal au flux volumique descendant le long des murs.

### Détermination des températures de zones

Generally, le plan neutre est situé à peu près au sommet de l'émetteur. Donc la température haute est celle qui assure l'équilibre entre le flux de chaleur en provenance du radiateur et les flux à travers la vitre, le plafond et le flux transitant vers la zone inférieure.

### Modèle à 5 zones

Le volume d'air intérieur est divisé en cinq zones isothermes, couplées ensemble par des conductances massiques. La circulation d'air s'effectuant entre les cinq zones est illustrée par la figure 2 :

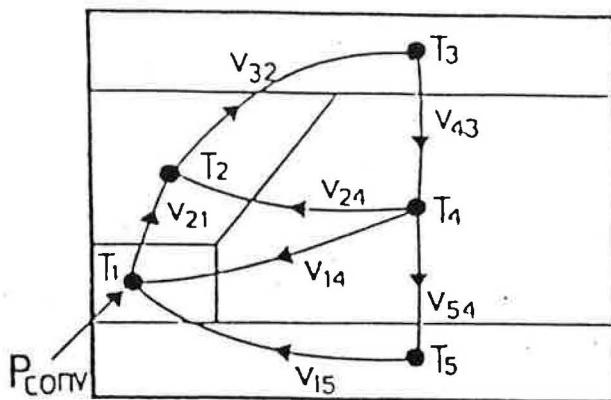


Figure 2 : Modèle à 5 zones. Division de la pièce

Pour chaque zone, les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont écrites. Afin de compléter la description du modèle, la puissance convective du radiateur ainsi que les différents coefficients d'échange convectif doivent être identifiés. Pour cela, une campagne de mesure a été menée dans une chambre climatique [6] avec différents types d'émetteurs. Ces mesures ont permis de déterminer des lois empiriques concernant la puissance convective du radiateur, les coefficients d'échanges convectifs entre le panache de l'émetteur et la vitre ou le plafond.

De plus, un module radiatif permet de calculer les flux de chaleur dus au rayonnement entre les parois et l'émetteur.

### comparaison avec des données expérimentales

Une première validation a été faite avec des mesures effectuées dans une chambre climatique [6] dont les dimensions sont 4m x 4m x 2.8m. Cette pièce était chauffée par un radiateur plan situé en allège de la fenêtre. Les mesures ont concerné :

- les températures de surface des murs, du sol, du plafond, de la fenêtre et du radiateur
- un profil de température vertical au centre de la pièce
- le flux convectifs et radiatifs aux parois

La figure 3 illustre la comparaison entre les profils mesurés et calculés au centre de la pièce

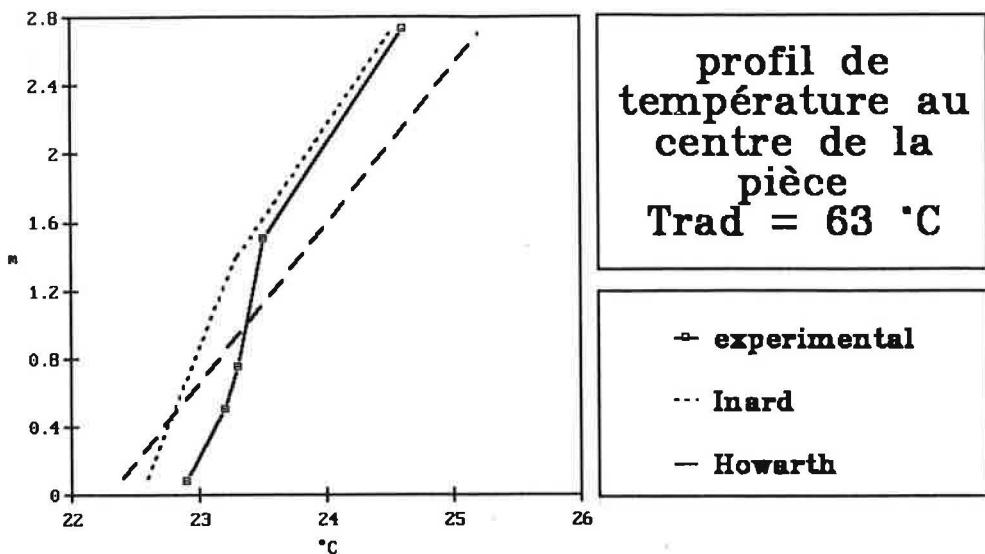


Figure 3 : Comparaison avec les mesures

### Comparaison sur un cas test de l'IEA

Les objectifs de l'Annexe 20 (Airflow Pattern Within Buildings) de l'IEA sont d'évaluer les performances des techniques de simulation d'écoulement d'air dans une zone d'habitation et entre les différentes zones d'un logement. Dans le cadre de la sous-tache 1 de cette annexe, quatre cas-test ont été définis. L'un d'entre eux porte sur le cas d'une pièce chauffée par un radiateur placé en allège de la fenêtre. La figure 4 décrit les conditions de ce cas-test.

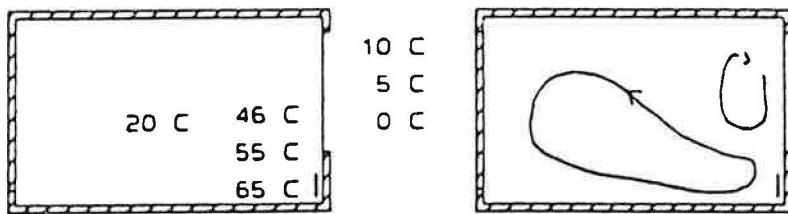


Figure 4 : Cas-test D de l'annexe 20 de l'AIE

Sur la figure 5, on peut voir les profils de température calculés par les deux modèles zonaux [7]. Ces résultats ont été superposés avec ceux obtenus par Chen [8] à l'aide du logiciel de résolution des équations de Navier-Stokes PHOENICS.

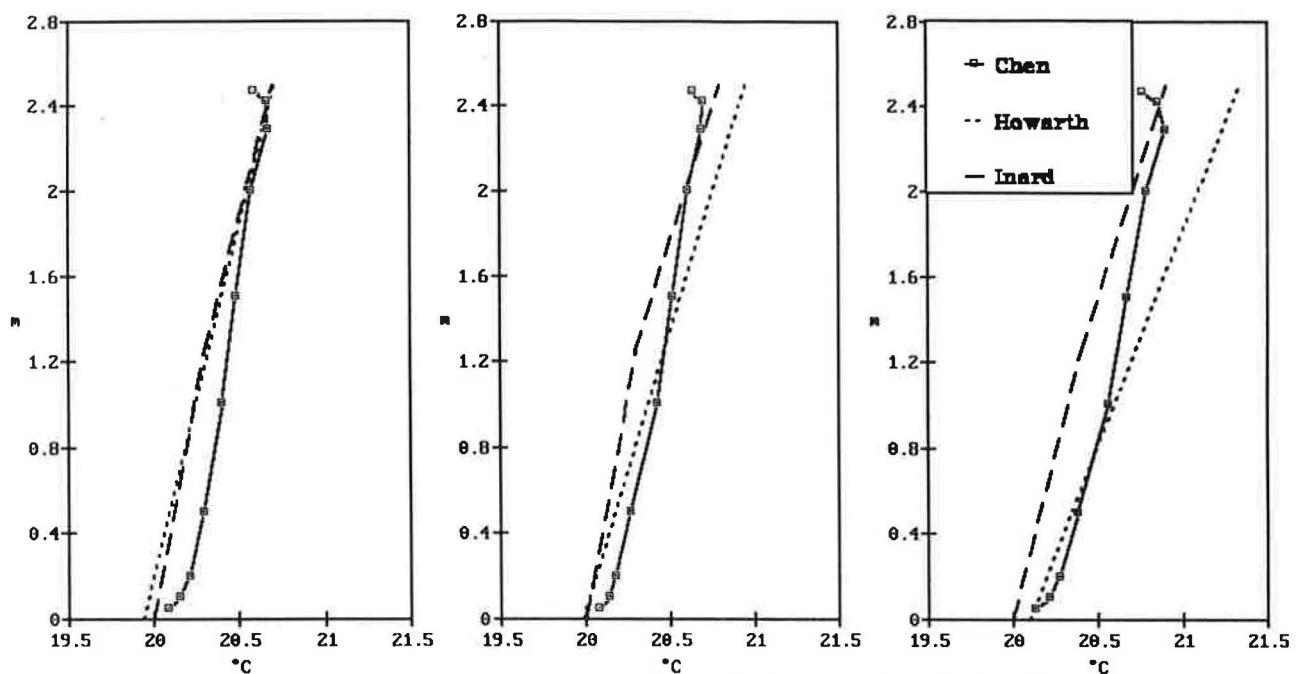


Figure 5 : Profils de température d'air au centre de la pièce

Il apparaît clairement que les modèles zonaux donnent des résultats comparables avec un modèle d'ordre supérieur pour des temps calcul considérablement moindre.

La comparaison porte également sur les flux convectifs en provenance de l'émetteur et à travers le vitrage. Cette comparaison est illustrée par la figure 6.

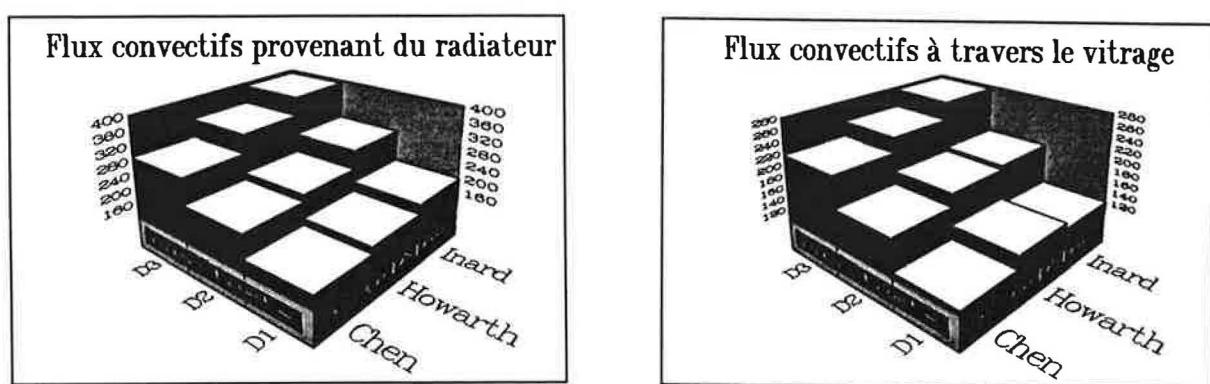


Figure 6

A partir de cette figure, on peut voir que les flux calculés sont du même ordre de grandeur pour les trois modèles.

# ETUDE DE LA STRATIFICATION THERMIQUE DANS LES LOCAUX DE GRAND VOLUME

## Objectifs Généraux

Les phénomènes thermiques et les mouvements d'air se produisant dans les locaux de grande hauteur donnent fréquemment lieu à des températures fortement hétérogènes, notamment dans le sens vertical.

En période hivernale, une stratification excessive se traduit par une température insuffisante en partie basse, et/ou des déperditions importantes en partie haute, surtout si la toiture ou les parties hautes des parois verticales sont faiblement isolées ou peu étanches, ce qui est le cas général des locaux industriels. En période d'été, on cherche parfois au contraire à favoriser la stratification pour améliorer le confort en partie basse. Pour maîtriser ces phénomènes, on a souvent recours à des dispositifs de soufflage d'air (aérothermes, diffuseurs...) généralement choisis, implantés et réglés de façon à assurer un confort minimum dans une zone déterminée ; dans les cas où une forte stratification est constatée, on cherche parfois à créer un brassage d'air au moyen de déstratificateurs, soufflant vers le bas l'air chaud situé en partie haute.

Mais la connaissance que l'on a des effets de ces diverses techniques procède essentiellement de l'empirisme et ne fournit guère de moyens très sûrs pour dimensionner au plus juste une installation aéraulique en fonction des résultats que l'on en attend. Le but de l'étude est donc d'améliorer cette connaissance au moyen d'une analyse quantitative des phénomènes en jeu, faisant appel à l'expérimentation et à la modélisation.

## Démarche adoptée

Une première étape, en vue de bien orienter l'étude, consiste à acquérir une connaissance qualitative et descriptive aussi explicite que possible des situations effectivement rencontrées, en ayant notamment en vue l'identification des facteurs les plus déterminants. Plusieurs installations ont ainsi été visitées et instrumentées, ce qui a permis d'aboutir à une première série de conclusions sur l'allure des champs de température dans un local chauffé par soufflage horizontal ou vertical d'air chaud.

Parallèlement, a été engagée une étude théorique et expérimentale sur le comportement des jets d'air. Les premiers résultats expérimentaux confirmant les données théoriques pour les jets libres axiaux, et permettent de compléter ces données par la prise en compte de l'aspect annulaire du jet engendré par un ventilateur hélicoïde, et de l'angle d'ouverture variable du jet. Les essais en laboratoire se sont poursuivis par la prise en compte de l'anisothermie et de l'interaction entre le jet et les parois du local.

Enfin, un modèle simplifié de représentation du champ thermique dans un local est développé et testé; ces premiers tests ont donné quelques résultats positifs ; diverses améliorations doivent y être apportées pour en améliorer la robustesse et la pertinence et pour lui permettre de prendre en compte, d'une part, des configurations tridimensionnelles, et d'autre part, la présence de jets d'air.

## Essais in situ

Des expérimentations ont été effectuées dans des gymnases [9]. Ce type de local est bien adapté à notre étude. On peut les considérer comme des locaux de grand volume ayant une hauteur importante. Ils ont des dimensions identiques ce qui a permis de faire une comparaison intéressante des résultats obtenus pour chaque expérimentation. Du fait de l'impossibilité de connaître certaines grandeurs telles que la puissance de chauffage, le débit des appareils, etc, n'ont été mesurées que les températures intérieures des locaux en différents points, ce qui a permis d'établir des cartographies précises du champ de température pour différentes hauteurs ainsi que des courbes montrant l'évolution de la température sur la hauteur du local. (figure 7)

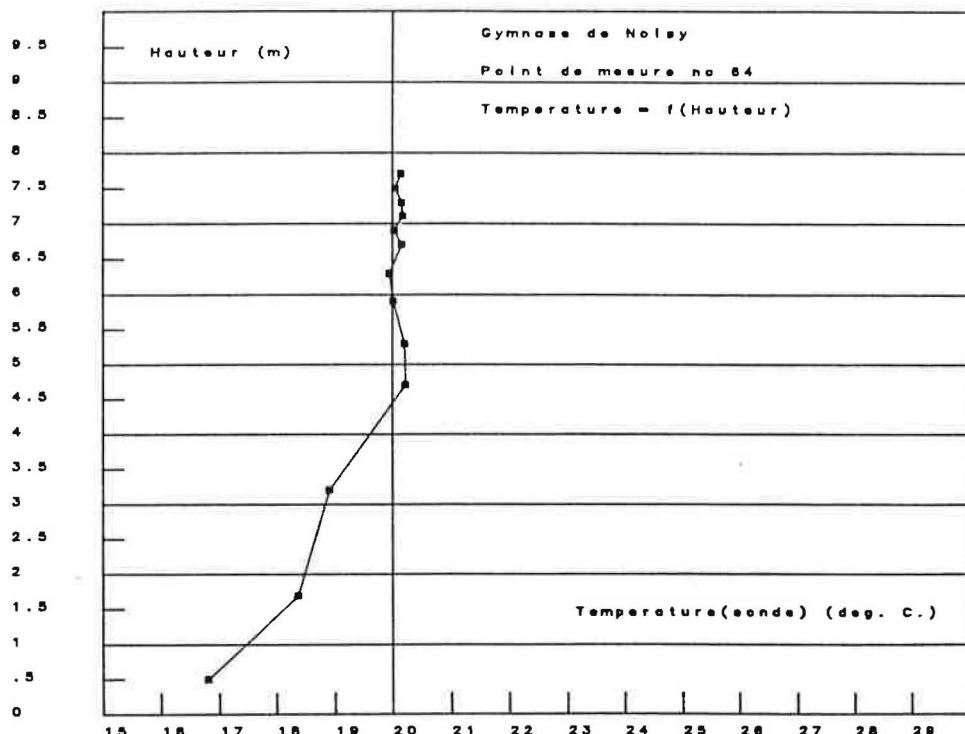


Figure 7 : Profil vertical de température dans un Gymnase

## Résultats obtenus

La première remarque que l'on peut faire suite à ces essais est l'importance de la disposition des appareils de chauffage. On a observé un écart entre le haut et le bas de 12°C pour le premier gymnase où les aérothermes sont situés sous la toiture, alors qu'il n'est que de 4°C pour le deuxième dans lequel les aérothermes sont disposés à une hauteur de 3,5 m du sol. Le profil vertical de température comporte deux parties :

- une partie basse entre le sol et les aérothermes où l'on observe un gradient de température élevé,
- une partie haute au-dessus des aérothermes dans laquelle le gradient de température est beaucoup plus faible.

Cette remarque pourrait être reprise pour l'élaboration d'un modèle simplifié dans lequel on discréterait l'espace en deux zones correspondant aux zones décrites ci-dessus.

À une hauteur donnée, le champ de température est assez homogène, lorsqu'il n'est pas perturbé par les aérothermes, ce qui peut justifier de prendre dans un modèle simplifié une discréétisation en couches horizontales isothermes.

Les remarques ci-dessus sont très proches de celles de MISSENARD dans son cours supérieur de chauffage et ventilation, à propos d'études et de mesures faites pour le chauffage aéraulique des grands locaux. Il observe la division en deux zones du volume, séparés par le plan de soufflage des aérothermes et ayant leurs propres lois de variation de la température en fonction de la hauteur. Il trouve également une bonne homogénéité de températures dans un plan horizontal. Ces remarques lui permettent de recommander de disposer les appareils de soufflage aussi bas que possible et d'effectuer la reprise d'air au niveau du sol, afin d'améliorer le brassage entre cette zone et la zone supérieure.

Des essais sont également en cours dans un des halls du CSTB qui a été équipé d'aérothermes à soufflage verticaux pouvant être ou non associés à des déstratificateurs. Des premières mesures après installation ( figure 8 ) indiquent que dans la zone d'occupation du hall, on peut considérer que le champ de température est homogène horizontalement.

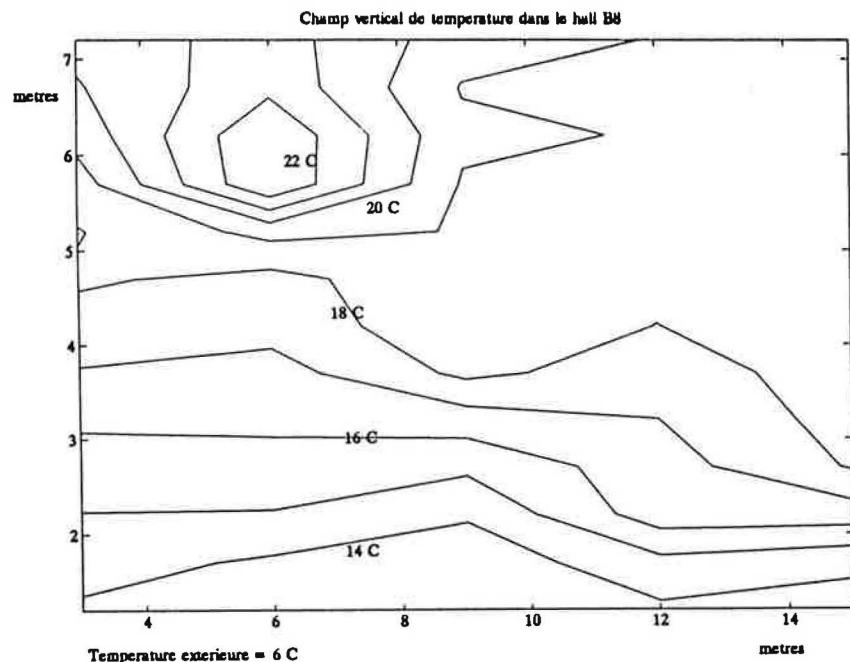


Figure 8 : Isocontours de température dans un plan vertical passant par les axes des aérothermes

### Essais en laboratoire

Les essais réalisés sur site ont montré la nécessité d'effectuer des investigations plus complètes en mesurant en plus des températures dans le volume un certain nombre d'autres paramètres nécessaires à la compréhension et à l'interprétation de phénomènes observés. Ces paramètres sont notamment : la vitesse dans le local, la température à la sortie de l'aérotherme, la puissance thermique soufflée, le débit de l'aérotherme. Ces essais, commencés en Janvier 1990 [10], ont permis d'étudier différents cas de figure de chauffage dans des conditions proches de la réalité, en faisant varier la puissance de chauffage, les débits d'air, l'emplacement en hauteur de l'appareil, le fonctionnement éventuel d'un déstratificateur.

Le dispositif utilisé est le même que lors d'essais sur site dans des gymnases. Il est composé d'un mât de hauteur réglable. Des thermocouples sont installées sur ce mât et sont reliées à une centrale d'acquisition de données Schlumberger Orion. Les données mesurées sont stockées par la centrale sur cassette puis transférées sur PC.

A titre d'exemple, la figure 9 montre l'effet de la mise en oeuvre d'un déstratificateur sur le profil de température.

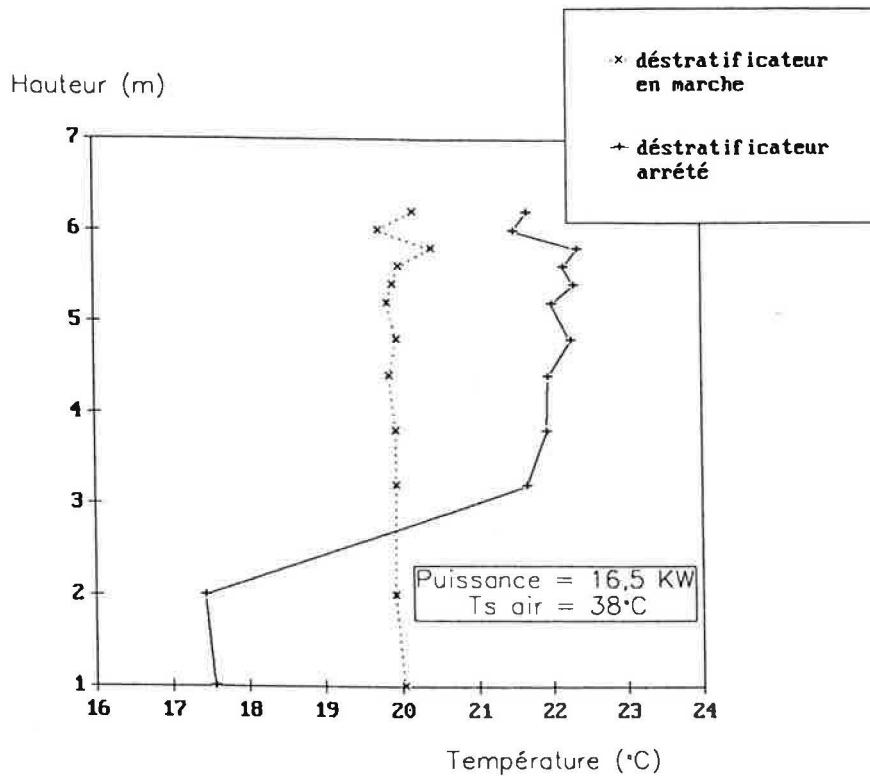


Figure 9 : Stratification - Destratification

Cette première série d'essais complète la connaissance des phénomènes de stratification dans les locaux de grand volume, acquise lors d'essais sur site dans des gymnases. Au cours de ces essais, on a retrouvé systématiquement dans les zones non influencées par le jet des profils de température de même type, avec un fort gradient de température entre le sol et une hauteur proche de celle de l'aérotherme, et une zone très homogène au dessus avec une température pratiquement uniforme. On a également pu mettre en évidence l'influence de certains paramètres:

- la puissance de chauffage
- la température de soufflage. Une augmentation de la puissance thermique soufflée par augmentation de la température de soufflage favorise la stratification thermique.
- la hauteur de l'aérotherme. Ce paramètre exerce une influence relativement faible : une plus grande hauteur de l'appareil abaisse la température dans l'espace situé au dessous de l'aérotherme sans augmenter considérablement la stratification.
- le fonctionnement du déstratificateur : Pour l'essai de déstratification effectué, l'efficacité de l'appareil jouait au détriment du confort et provoquait de forts courants d'air dans la zone d'occupation. Se pose ici le problème du dimensionnement de l'appareil, avec le choix de un ou plusieurs appareils dont le débit et la portée soient compatibles avec les exigences de confort et de limitation de la stratification

On a également retiré des informations concernant les moyens de mesure qui ont été développés et les améliorations souhaitables en vue d'une poursuite des essais.

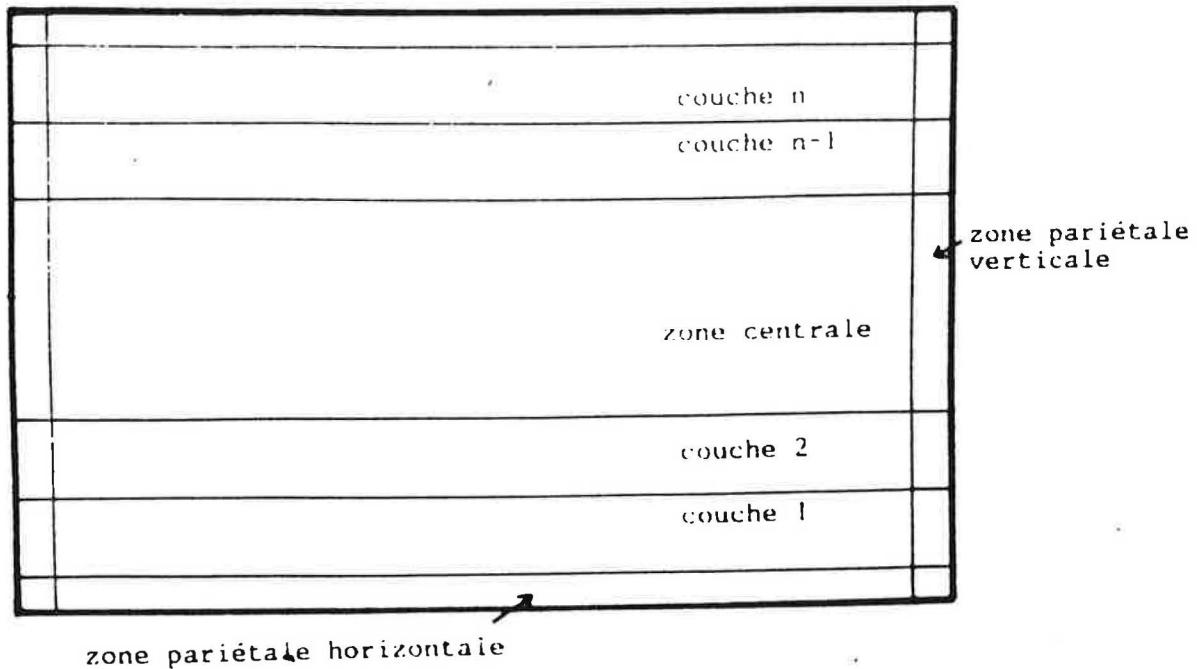
La campagne d'expérimentations engagées doit se poursuivre durant l'année 1991 afin de préciser l'influence quantitative des principaux facteurs sur la stratification thermique. L'objectif final de cette étude reste la caractérisation du jet et de son impact sur le champ de température du local, caractérisation devant déboucher, in fine, sur un modèle pouvant être intégré dans des codes de calcul simplifiés.

## Modélisation

Etant donné l'échelle à laquelle ont lieu les phénomènes influençant la stratification dans les locaux de grands volumes, il est illusoire de vouloir utiliser des modèles du type Navier-Stokes. Les recherches sur ce sujet en terme de modélisation s'orientent donc sur des modèles de type zonal.

Les premières mesures effectuées dans des gymnases montrent que dans des locaux de grande hauteur, la stratification en température présente une bonne homogénéité horizontale, c'est pour cette raison que nous avons choisi de développer un modèle macrovolume à partir des travaux de E. HUTTER [4].

Le modèle SIMAIR a été élaboré dans le but de déterminer la stratification de la température à l'intérieur des locaux de grand volume (galeries couvertes en l'occurrence). Il fait donc intervenir une discrétisation de la couche centrale en  $n$  couches superposées.



La résolution se fait de la manière suivante :

- détermination des flux entrants et sortants des zones parietales,
- détermination des volumes entrants et sortants des couches centrales, ce qui nécessite l'introduction d'une fonction de mélange analytique,
- équilibre de ces volumes par "effet piston",
- bilan thermique pour déterminer les températures des différentes couches.

L'avantage de ce modèle par rapport aux précédents est que les zones parietales étant elles aussi discrétisées, il est possible de modéliser des conditions de flux non homogènes sur une même paroi.

## CONCLUSION

Les études actuellement menées montrent la potentialité des modèles zonaux, aussi bien dans le domaine de l'étude de la stratification dans les locaux de grand volume que dans le domaine de l'étude des déperditions thermiques et du confort dans les logements.

L'intérêt de ces modèles reside essentiellement dans leur faible coût calcul qui devrait rendre possible leur intégration dans des modèles multizones d'habitations. De plus les possibilités de couplage entre les phénomènes radiatifs, convectifs et conductifs permet de les utiliser comme outils prédictifs.

Les points que les recherches futures doivent développer ou approfondir sont les suivants :

- la prise en compte d'autres phénomènes pouvant influencer les mouvements d'air dans un local ( effet de l'ouverture des portes, entrées d'air et bouches d'extraction, ...)
- inclure d'autres types de chauffage utilisés dans l'individuel ou le collectif ( plafond ou plancher chauffant, par exemple )
- la modélisation du transport-diffusion des polluants

Tous ces développements demanderont bien évidemment des validations expérimentales

En ce qui concerne l'étude des grands volumes, l'objectif est de pouvoir décrire et prévoir, en conditions anisothermes, l'interaction entre un dispositif de soufflage d'air et un local de grandes dimensions, ce qui implique :

- de définir les caractéristiques utiles d'un dispositif de soufflage,
- de représenter le comportement thermique et aéraulique d'un local ventilé d'une manière qui rende compte, de façon au moins approximative, des phénomènes qui viennent d'être évoqués.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lebrun J. 1970.  
Exigences physiologiques et modalités physiques de la climatisation par source statique concentrée  
Thèse de doctorat de l'Université de Liège
- [2] Laret L. 1980.  
Contribution au développement de modèles mathématiques du comportement thermique transitoire de structures d'habitation  
Thèse de Doctorat de l'Université de Liège.
- [3] Ngendakumana P. 1988.  
Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment et vérification expérimentale  
Thèse de Doctorat de l'Université de Liège.
- [4] Hutter E. 1981  
Etude du comportement thermique des galeries couvertes par simulation en régime varié avec prise en compte de la stratification de l'air  
Thèse de doctorat
- [5] Howarth A.T. 1980.  
Temperature distribution and air movements in rooms heated with a convective heat source  
Philosophy Doctor of University of Manchester.
- [6] Inard C. 1988.  
Contribution à l'étude du couplage thermique entre une source de chaleur et un local  
Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [7] Inard C. and D. Buty 1990.  
Simulation of testcase D with zonal models  
R.I. n°1.26, International Energy Agency, Annex 20.
- [8] Chen Q. 1990.  
Simulation of testcase d (free convection with radiator)  
R.I. n°1.21, International Energy Agency, Annex 20
- [9] Socquet F. 1989  
Mesure du champ de température dans des locaux de grand volume  
GEC 89-4826
- [10] Socquet F. Buty D. 1990  
Essai en situation réelle d'un aérotherme couplé à un déstratificateur  
GEC/DAC-90.126R

## MODELES ZONaux ET GRAND VOLUMES

C. Inard  
Centre de Thermique  
INSA Lyon  
Bât. 307  
20, av. Albert Einstein  
69621 Villeurbanne  
FRANCE

D. Buty  
CSTB  
84, av. Jean Jaurès  
B.P. 02  
Champs/Marne  
77421 Marne la Vallée Cedex2  
FRANCE

Les modèles zonaux sont des modèles simplifiés bien adaptés à la détermination des transferts de masse et de chaleur à l'intérieur d'un local. Leur faible coût calcul permet d'envisager leur intégration dans des modèles multizones du bâtiment. Ce papier sera divisé en deux parties :

la première traitera de l'application de deux modèles zonaux développés au CSTB et à l'INSA de Lyon au cas d'une pièce d'habitation chauffée par un radiateur placé en allège d'une fenêtre. Après une présentation rapide des modèles, une comparaison avec des essais à échelle 1 en chambre climatique est présentée. Les deux modèles sont ensuite confrontés à un modèle  $k-\epsilon$  à bas nombre de Reynolds sur un des cas-tests définis dans le cadre de l'Annexe 20 de l'Agence Internationale de l'Energie.

La deuxième partie traitera du programme de recherche qui a été engagé au cours du second semestre 1988 par le CSTB en vue d'améliorer les connaissances sur les champs de température dans les locaux de grande hauteur. Les études récentes ont essentiellement concerné des mesures de stratification dans des locaux réels, l'étude du comportement des jets anisothermes dont nous présenterons les premiers résultats. Enfin l'applicabilité des modèles zonaux pour traiter ce type de problèmes sera étudiée.

## ZONAL MODELS AND LARGE VOLUME SPACES

Zonal models are a promising way to predict air movement in a room with respect to comfort conditions, because they require extremely low computer time and may be therefore rather easily included in multizone air movement models.

A first objective of this paper is to study the ability of the zonal models to predict the thermal behaviour of air in case of natural convection coupled with a radiator. First, we present two zonal models available in the literature. In that way, we describe the main hypotheses of the Howarth two zone model and the five zone model proposed by Inard. A first validation on a experimental comparison is presented. With the support of the IEA Annex 20 (Air flow pattern within buildings) testcase, we compare the results of the models. Furthermore, a comparison is made with the results of Chen obtained by simulation with a Low Reynolds number  $k-\epsilon$  model. First, it appears that all zonal models give indoor air temperature profiles consistent with Low Reynolds number  $k-\epsilon$  results.

In a second part, new studies about airflow patterns and thermal stratification in large volumes enclosures are presented. These studies deal with full scale experimental measurements in factories and gymnasium, experimental sensitivity tests on a anisothermal horizontal jet in a large volume hall, and applicability of zonal models in order to determine temperature profile in large volume spaces.