

5736  
DCC 1002

livraison 309  
mai 1990  
cahier 2411

**CAHIERS  
DU CSTB**

**étude des phénomènes  
thermoconvectifs  
à l'intérieur des pièces**

Jacques Ribéron, Dominique Bienfait, Éric Hutter

études et recherches

223

## RÉSUMÉ

Les recherches en matière de mouvement d'air à l'intérieur des bâtiments visent à améliorer les méthodes d'évaluation de la qualité des systèmes dans leurs aspects liés au confort (courants d'air gênants, ...), à l'hygiène (efficacité des systèmes de ventilation, ...) ou aux consommations d'énergie (maîtrise de la stratification des températures).

On présente ici les moyens théoriques et expérimentaux développés au CSTB pour mener à bien ces études.

La cellule EREDIS, implantée à la station de recherche de Marne-la-Vallée, est destinée à étudier, à l'échelle 1, les champs de température et de vitesse d'air dans les locaux en fonction des sollicitations (chauffage, ventilation, ...) auxquelles ils sont soumis. Il s'agit d'un outil particulièrement adapté à l'analyse expérimentale de la qualité des ambiances intérieures (confort thermique, mais aussi mouvements de l'air) et à l'étude du rendement d'émission des différents procédés de chauffage (chauffage par le sol, par le plafond, convecteur, ...). On présente, après une description de la cellule d'essai, les travaux de recherche menés ces dernières années au CSTB ainsi que les principaux résultats obtenus.

Les recherches s'orientent actuellement vers le développement de codes de calcul de mouvements d'air destinés à assurer l'indispensable complément théorique aux recherches expérimentales et portent plus spécialement sur l'utilisation de la technique dite des volumes de contrôle.

## SUMMARY

Research concerning the movement of air inside buildings is aimed at improving methods for assessing system quality in aspects linked to comfort (annoying drafts, etc.), hygiene (ventilation system efficiency, etc.) or to energy consumption (control of temperature stratifications).

In this article, the theoretical and experimental resources developed at the CSTB to carry out these studies successfully, are presented.

The EREDIS cell, located at the Marne-la-Vallée research station is designed to study, at scale 1, the temperature fields and air velocity in premises as a function of the stresses (heating, ventilation, etc.) to which they are subjected. It is a tool, particularly well adapted to experimental analysis of the quality of interior environments (thermal comfort, but also air movement) and to studying emission efficiency of the different heating processes (floor heating, ceiling heating, convectors, etc.). After a description of the test cell, a presentation is given of the research work carried out over the past few years at the CSTB as well as the principal results obtained.

At present, research is oriented toward the development of design codes of air movements destined to ensure the indispensable theoretical addition to experimental research and dealing more specifically with utilization of the technique known as « control volumes ».

## RESUMEN

Las investigaciones llevadas a cabo en el aspecto de los desplazamientos de aire en el interior de los edificios tienen por propósito mejorar los métodos de evaluación de la calidad de los sistemas en los aspectos relacionados con el confort (corrientes de aire molestas, etc.), la higiene (eficacia de los sistemas de ventilación, etc.) o con los consumos de energía (gestión de la estratificación de las temperaturas).

Se presentan en este artículo los medios teóricos y experimentales desarrollados por el CSTB para llevar a buen término estos estudios.

La célula EREDIS, implantada en la estación de investigaciones de Marne-la-Vallée está destinada a estudiar, a escala real, los campos de temperatura y de velocidad del aire en los locales según las sollicitaciones (calefacción, ventilación, etc.) a que se encuentran sometidos. Se trata de un instrumento perfectamente bien adaptado para un análisis experimental de la calidad de los ambientes interiores (confort térmico, pero, asimismo, desplazamientos del aire) y para el estudio del rendimiento de emisión de los distintos procedimientos de calefacción (calefacción por el suelo, por el techo, por convector, etc.). Tras una descripción de la célula de pruebas, se exponen los trabajos de investigación emprendidos durante estos últimos años por parte del CSTB, así como los principales resultados conseguidos.

En la actualidad, las investigaciones se orientan hacia el desarrollo de códigos de cálculo de los desplazamientos del aire, con la intención de obtener el indispensable complemento teórico de las investigaciones experimentales y haciendo hincapié, particularmente, para todo aquello que se refiere a la utilización de la técnica denominada « de los volúmenes de control ».

# étude des phénomènes thermoconvectifs à l'intérieur des pièces

Jacques Ribéron, Dominique Bienfait, Eric Hutter  
ingénieurs au CSTB

## sommaire

---

1 introduction .....	2
----------------------	---

---

2 dispositif expérimental .....	2
2,1 enceinte d'essai : EREDIS .....	2
2,2 instrumentation .....	3

---

3 études expérimentales .....	4
3,1 introduction de l'air en façade .....	4
3,2 diffusion de l'air soufflé .....	6
3,3 comportement aéraulique des bouches de soufflage en climatisation .....	8
3,4 étude des émetteurs de chaleur .....	8

---

4 modélisation numérique .....	10
--------------------------------	----

---

5 conclusion .....	11
--------------------	----

---

bibliographie .....	12
---------------------	----

---

# 1

## introduction

Les mouvements de l'air dans un local ont une influence déterminante sur l'ambiance thermique qui y règne ainsi que sur les échanges thermiques qui s'y produisent.

L'hétérogénéité des températures, les courants d'air, la stratification thermique sont des phénomènes liés aux mouvements de l'air. Les températures superficielles des parois qui peuvent parfois être source d'inconfort lorsqu'elles sont trop élevées ou trop faibles, dépendent également des phénomènes de convection intérieure.

Les déperditions thermiques à travers les parois extérieures sont en partie liées aux mouvements de l'air au voisinage de ces parois. De même, les pertes par renouvellement d'air dépendent des échanges convectifs au niveau des bouches d'extraction.

Ces quelques exemples montrent l'importance qu'il y a de connaître les phénomènes thermoconvectifs de façon à fournir aux professionnels du bâtiment les éléments nécessaires pour réaliser des installations performantes tant du point de vue du confort thermique que des économies d'énergie.

La connaissance des transferts thermiques à l'intérieur d'un local peut s'effectuer soit par une approche expérimentale, soit par une approche numérique, cette dernière approche devant s'appuyer sur des résultats expérimentaux.

Plusieurs outils expérimentaux dédiés à l'étude des phénomènes thermoconvectifs ont été développés au CSTB : la cellule DESYS, implantée à l'établissement de Sophia Antipolis, permet notamment d'étudier les transferts entre différentes pièces d'un même logement ; la cellule DIESE, implantée à l'établissement de Marne-la-Vallée, est plus spécifiquement utilisée pour l'étude des plafonds chauffants ; enfin, la cellule EREDIS, également implantée à l'établissement de Marne-la-Vallée, permet d'étudier, de façon fine, les mouvements d'air à l'intérieur d'une pièce.

Dans le présent article, après une présentation de l'enceinte EREDIS, on expose quelques résultats des travaux de recherche menés depuis plusieurs années. On s'attache également à montrer la complémentarité existant entre les approches expérimentale et numérique.

# 2

## dispositif expérimental

### 2,1 enceinte d'essai : EREDIS

L'enceinte d'essai EREDIS (Enceinte de REcherche sur la Diffusion de l'air et les Interactions Système-enveloppe), implantée à l'établissement de Marne-la-Vallée du CSTB est consacrée à l'étude des phénomènes thermoconvectifs à l'intérieur des pièces.

EREDIS est une cellule d'essai, en vraie grandeur, à parois légères ou à circulation d'eau, permettant des mises en régime relativement rapides. Elle présente deux caractéristiques originales : la géométrie variable et le contrôle des parois en température ou en flux.

Les trois dimensions de l'enceinte d'essai peuvent être modifiées grâce au plafond suspendu mobile et aux trois cloisons intérieures mobiles (fig. 1). Les plages de variation des dimensions de l'enceinte permettent la reproduction d'un grand nombre de types de locaux à une seule façade depuis la petite chambre ( $2,7 \times 2,7 \times 2,5$  m) jusqu'au grand bureau ( $7,2 \times 4,5 \times 3,0$  m). La profondeur de la pièce est variable suivant un pas de 90 cm, la largeur peut varier continûment entre 2,7 m et 4,5 m.

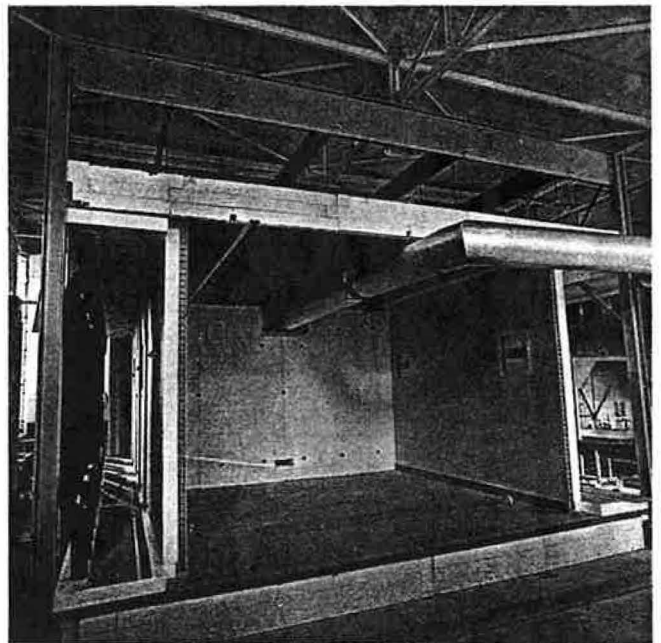


Figure 1 Vue extérieure de l'enceinte d'essai

On distingue, sur cette photo, les cloisons légères et le plafond suspendu.

Les cloisons intérieures sont adiabatiques : elles sont constituées de panneaux composites à parement de plâtre isolés extérieurement par 10 cm de polystyrène.

La paroi verticale extérieure est constituée de panneaux à circulation d'eau (chaude ou glacée) isolés extérieurement, et dont la face intérieure peut être revêtue de l'épaisseur appropriée d'isolant simulant la partie opaque de la façade (fig. 2). Toutes les géométries de vitrage sont réalisables.

La simulation de la température extérieure est obtenue par affichage de la température du vitrage.

Les apports solaires peuvent être simulés par un film chauffant posé sur le plancher.

## 2,2 instrumentation

Un dispositif original a été adopté pour mesurer le champ de températures et vitesses d'air à l'intérieur du local : il s'agit d'un thermoanémomètre à impulsions conçu et réalisé par le Centre d'Études et de Recherches de Toulouse (ONERA-CERT).

Le mode d'excitation des capteurs thermorésistants est différent de celui utilisé en anémométrie classique. En effet, le pont de Wheatstone est ici alimenté à chaque cycle de mesure par deux impulsions brèves de puissance de crête élevée, mais de puissance moyenne faible. Par ce procédé, on accède, à l'aide d'un seul capteur, à la mesure quasi instantanée de la

température et de la vitesse d'air, moyennant un étalonnage préalable de la sonde. Ce dispositif de mesure présente bien d'autres avantages et répond particulièrement bien aux problèmes spécifiques que pose la mesure de faibles vitesses d'air dans un local [1].

L'équipement thermoanémométrique comprend le thermoanémomètre proprement dit qui assure l'acquisition analogique des données fournies par 32 sondes et un microcalculateur ayant notamment pour fonction d'effectuer la compensation des variations de température ambiante et la traduction des deux paramètres mesurés en grandeur physique.

Les sondes thermoanémométriques sont constituées de thermistances de faible encombrement. Elles ont été étudiées et réalisées par le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) ; elles sont adaptées à la mesure des faibles vitesses d'air et conçues pour minimiser l'influence de la direction de la vitesse (fig. 3).

L'exploration des champs de vitesses et températures d'air est obtenue à l'aide de 32 sondes thermoanémométriques réparties sur un cadre de mesure se déplaçant suivant la profondeur de la pièce (fig. 2).

Outre cet équipement spécifique, EREDIS est dotée d'un appareillage de base qui autorise un contrôle rigoureux des conditions d'essai et une détermination précise et systématique des différents paramètres caractéristiques de l'ambiance thermique et des systèmes de chauffage, climatisation ou ventilation [1]. Citons parmi les grandeurs mesurées : les températures superficielles des parois, les températures d'air aux orifices d'insufflation ou d'extraction, les températures des émetteurs de chaleur, les débits d'air, les consommations énergétiques des corps de chauffe, ...

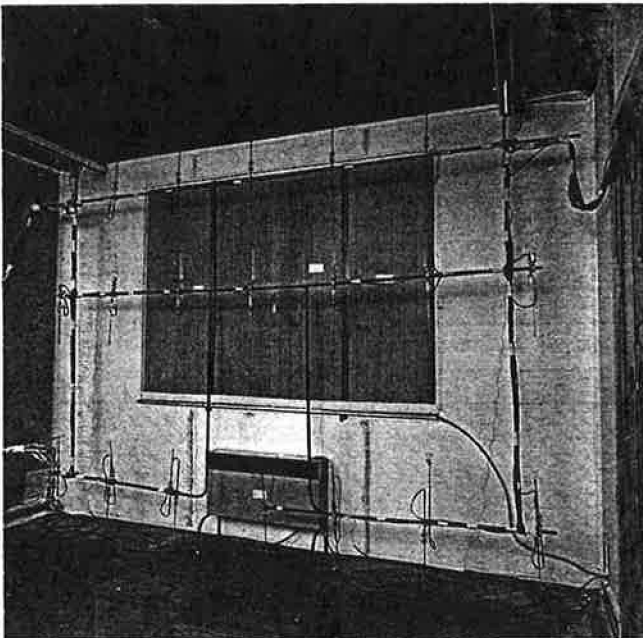


Figure 2 Vue intérieure de l'enceinte d'essai

Le cadre mobile de mesure des vitesses et température d'air se trouve contre la paroi froide.

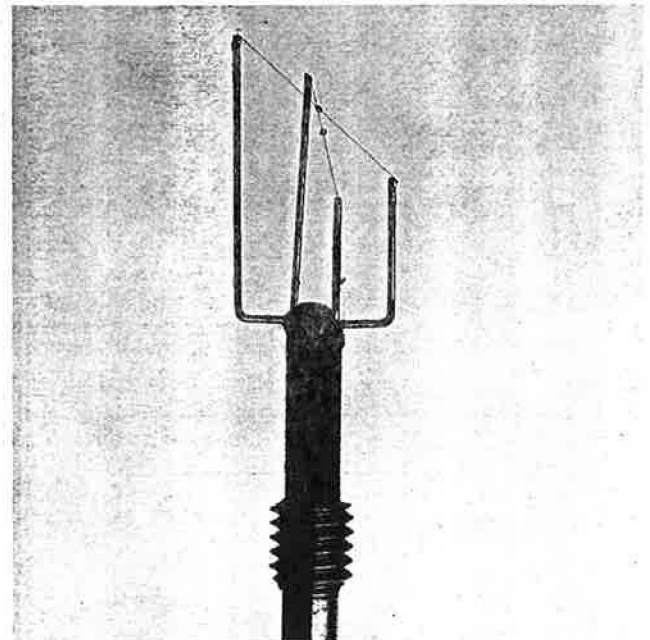


Figure 3 Vue détaillée d'une sonde thermoanémométrique

Pour minimiser la sensibilité de la sonde à la direction de la vitesse, on utilise deux thermistances. Diamètre d'une thermistance : 0,36 mm.

Les expérimentations menées depuis plusieurs années dans la cellule EREDIS ont déjà permis d'améliorer les connaissances sur les performances énergétiques de nombreux dispositifs de chauffage, rafraîchissement et ventilation ainsi que d'apprécier leur effet sur le confort thermique [2] [10].

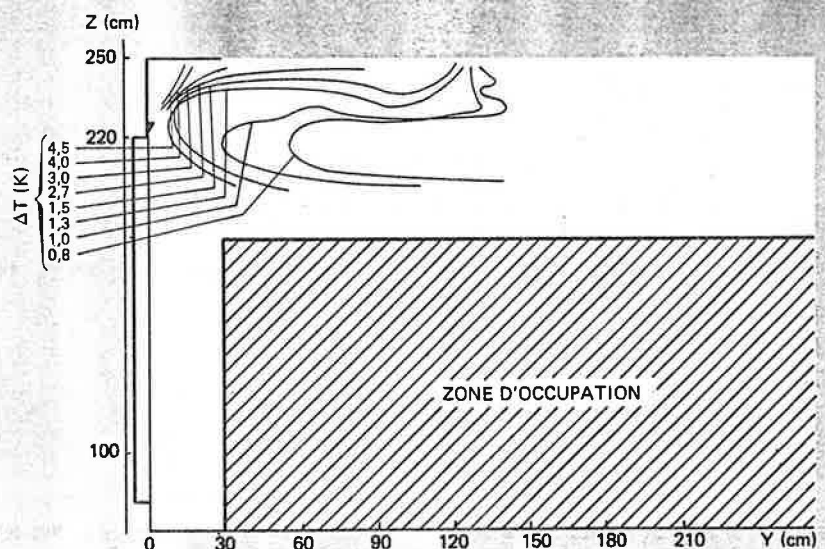
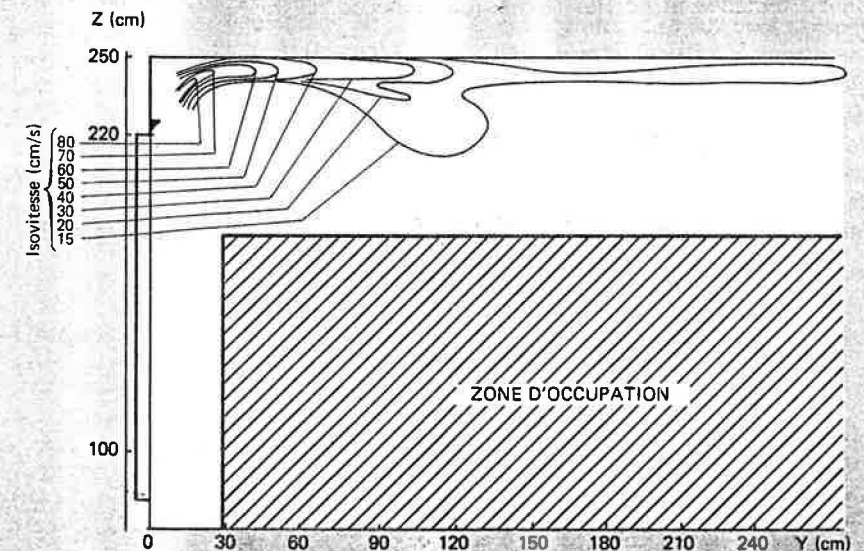
Sont présentés ci-après quelques résultats de recherches menées au CSTB sur la diffusion de l'air et sur les transferts thermiques intérieurs.

### 3,1 introduction de l'air en façade

Dans un local chauffé où le chauffage assure le confort thermique des occupants au centre du local, la présence d'une entrée d'air neuf peut avoir une incidence sur les conditions de confort en certains points du volume habitable. Les essais entrepris ont permis d'apprécier les risques de courants d'air froid dus à une entrée d'air autoréglable [3].

L'enceinte d'essai est ici représentative d'une pièce d'habitation de dimensions  $3,6 \times 3,6 \times 2,5$  m équipée d'un chauffage au sol uniformément réparti assurant une température intérieure de  $20^\circ\text{C}$ . L'air est introduit à une température de  $0^\circ\text{C}$  par un orifice d'entrée d'air autoréglable de débit type  $30\text{ m}^3/\text{h}$  placé au-dessus d'une baie vitrée dont la température superficielle est, de façon à rendre compte de la température extérieure, maintenue à  $7^\circ\text{C}$ .

FIGURE 4 MOUVEMENTS D'AIR INDUITS PAR UNE ENTRÉE D'AIR

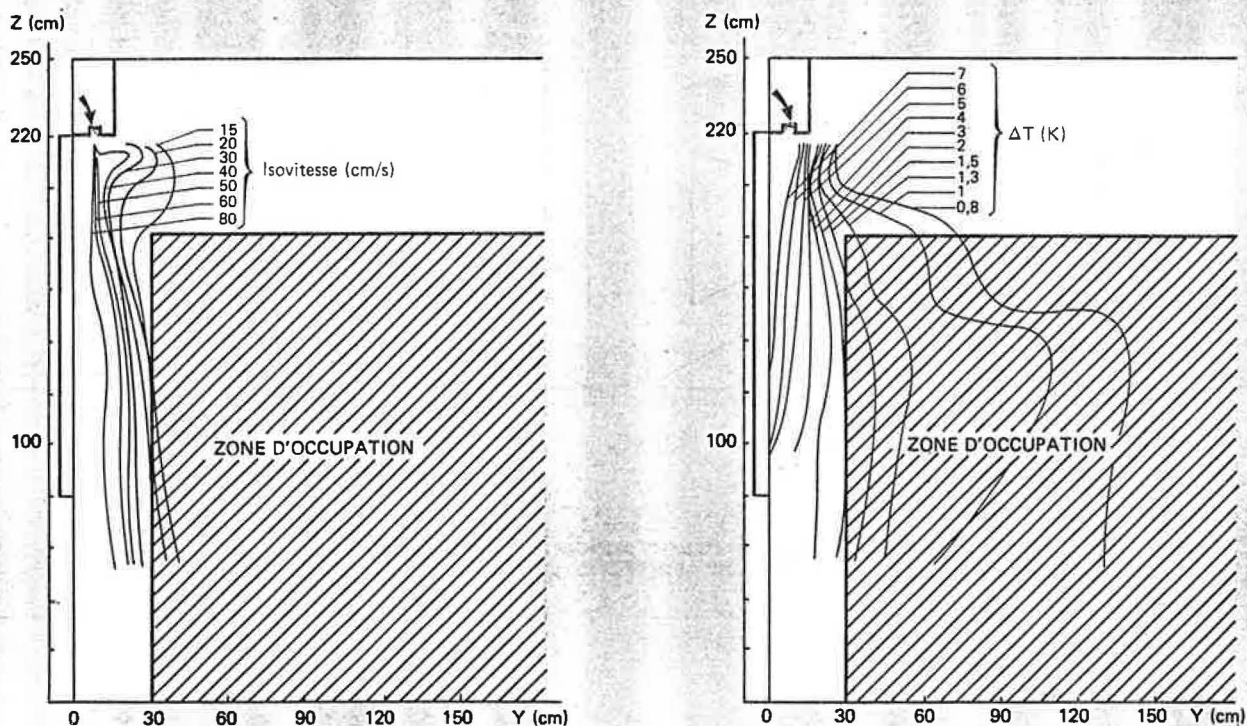


Vitesses d'air en cm/s  
Différence de température  $\Delta t$  en K

Premier cas : l'entrée d'air est disposée sur une paroi verticale

La méthode d'exploration a permis de mettre en évidence une pénétration éventuelle du jet d'air froid dans la zone d'occupation. On a pu observer que, quel que soit le type de bouche d'entrée d'air, lorsque celle-ci est placée en paroi verticale à une distance faible du plafond (entrée d'air à jet horizontal), le jet est fortement dévié vers le plafond grâce à l'effet Coanda, le risque de pénétration dans la zone d'occupation est nul (fig. 4, 1<sup>er</sup> cas). Lorsque la bouche d'entrée d'air est disposée dans la partie horizontale d'un coffre de volet roulant (entrée d'air à jet vertical), une déflexion du jet d'air vers la façade est nécessaire ; dans tous les autres cas, des gênes apparaissent localement près de la façade (fig. 4, 2<sup>e</sup> cas).

FIGURE 4 MOUVEMENTS D'AIR INDUITS PAR UNE ENTRÉE D'AIR (suite)



**Deuxième cas : l'entrée d'air est disposée sur une paroi horizontale**

Les entrées d'air doivent être conçues et disposées de façon à éviter dans la zone d'occupation les causes d'inconfort liées à des vitesses d'air excessives ou à des températures trop basses. Les schémas représentent les enregistrements de vitesse d'air et de température (on a représenté la différence  $\Delta t$  entre la température au centre de la pièce et la température locale) dans le cas d'une entrée d'air délivrant un débit de 30 m<sup>3</sup>/h à une température de 0 °C.

Dans le cas d'une entrée d'air en paroi verticale avec jet dirigé vers le haut, le jet d'air reste localisé par effet Coanda au plafond, et l'inconfort est moindre.

### 3,2 diffusion de l'air soufflé

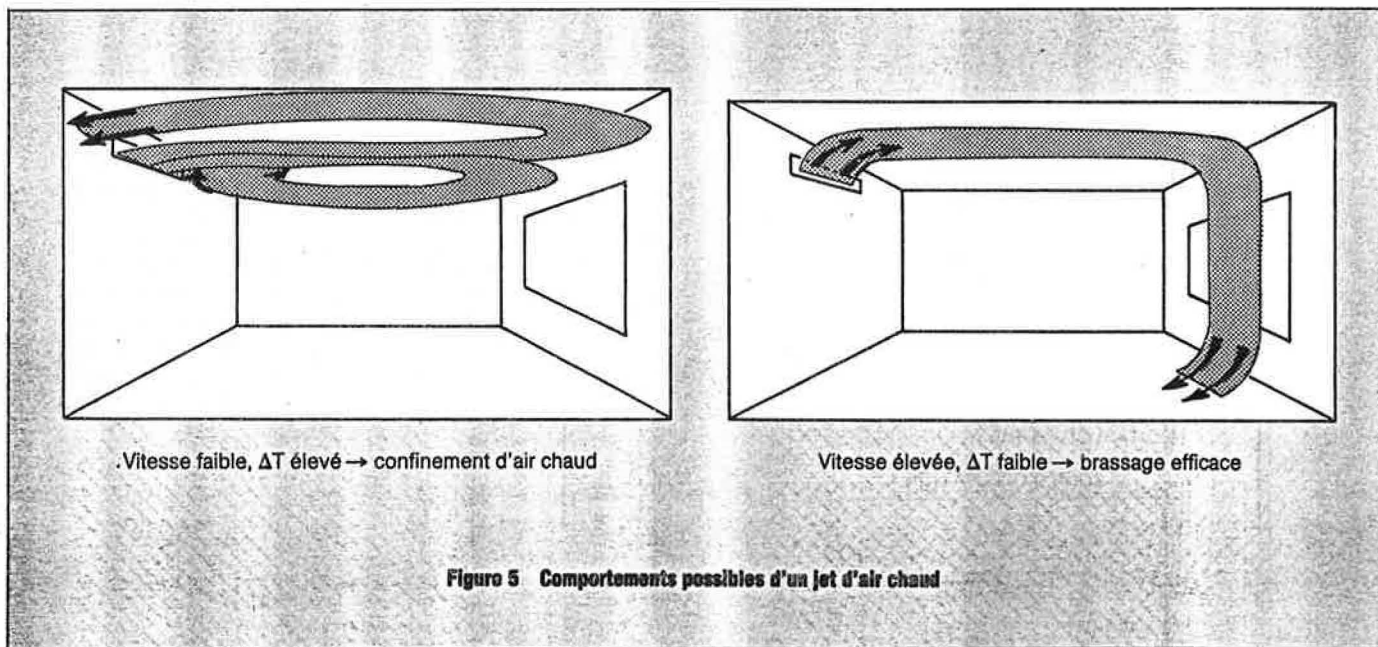
Un important programme de recherche sur l'insufflation de l'air en fond de pièce a été mené dans la cellule EREDIS [1] [4]. Cette étude a permis de déterminer les conditions suivant lesquelles doit fonctionner un système d'insufflation d'air associé éventuellement à un chauffage complémentaire pour satisfaire les exigences de confort thermique à l'intérieur d'un local.

La qualification de l'ambiance thermique s'effectue à l'aide du profil UCRES [5] [11] qui rend compte de l'intensité et de la fréquence des différentes causes d'inconfort éventuellement présentes (voir encadré page ci-contre).

Des mesures ont été effectuées dans de nombreuses configurations en faisant varier des paramètres tels que les conditions d'insufflation (température, débit, type de bouche, distance au plafond), le niveau d'isolation de la façade, la nature du chauffage d'appoint (plancher chauffant, convecteur), ...

L'étude a montré que, pour un local bien isolé, les systèmes à air soufflé, lorsqu'ils sont convenablement installés ne créent pas de gêne spécifique et peuvent, au contraire, atténuer certaines gênes dues au chauffage statique. Elle a également mis en évidence l'existence, dans le cas d'un chauffage à air chaud, de deux types de comportement de l'air assez contrastés dont l'un favorise la stratification thermique et l'autre, le brassage de l'air dans le local (fig. 5).

L'analyse de ces comportements des jets d'air chaud a contribué à la formulation d'une méthode pratique de dimensionnement des bouches de soufflage en chauffage aéroulique [6].





Le CSTB a élaboré une méthode de caractérisation du degré d'homogénéité de l'ambiance thermique d'un local au centre duquel le confort est assuré en fonction de sa géométrie et des contraintes thermiques données.

La procédure expérimentale consiste à explorer en régime permanent les vitesses et températures d'air au sein de la zone d'occupation, et à mesurer les températures superficielles des parois afin de pouvoir calculer les indices caractéristiques de différents types de gêne.

Cinq critères ont été retenus à partir desquels ont été formulées des exigences :

- **Uniformité horizontale**  
Ce critère traduit la répartition du confort global de l'individu, intégré sur une verticale et est lié à l'écart moyen de température résultante entre une verticale quelconque et la verticale du centre du local.
- **Courants d'air**  
La gêne due aux courants d'air froid est assimilée à la somme de deux écarts de température d'air : l'un correspondant à la différence entre la température locale et la température au centre de la pièce, l'autre fictif traduisant l'augmentation des échanges convectifs due à la vitesse locale de l'air. Cette notion a été étendue aux courants d'air chaud.
- **Rayonnement dissymétrique**  
Lorsque l'environnement radiatif d'un local présente des hétérogénéités importantes, dues par exemple à la présence d'une fenêtre froide ou d'un plafond chauffant, la notion de température moyenne de rayonnement ne suffit plus pour apprécier les gênes d'origine radiative. On retient un critère basé sur un écart de température radiante orientée.
- **Ecart thermique tête-pieds**  
Dans tout local soumis à des contraintes thermiques s'établit une stratification des températures. Lorsque le gradient vertical de température d'air est important, les occupants peuvent ressentir une sensation de gêne (impression de froid aux pieds, ou de chaleur à la tête), bien que la température moyenne n'affecte pas le confort thermique global. Le critère retenu est l'écart de température d'air mesuré sur une même verticale à 0,1 m et 1,8 m au-dessus du sol.

● **Sol froid ou chaud**

En raison du contact direct des pieds avec le sol, une température superficielle trop faible ou trop forte peut être source d'inconfort.

Pour tous ces indices, on a défini des seuils délimitant trois classes : une classe 0 qui correspond à une situation confortable, une classe 1 légèrement inconfortable, et une classe 2 nettement inconfortable.

Les indices étant calculés en un grand nombre de points de la zone d'occupation, on comptabilise pour chaque critère le pourcentage de points en classe 1 et en classe 2. Une formule synthétique permet de donner à chaque type de gêne une note affectée d'un signe plus ou moins selon qu'il s'agit d'une gêne chaude ou froide.

La note 0 correspond au confort parfait, la note 5 à la situation la plus défavorable ; la note 2,5 correspond, soit à 20 % de points nettement inconfortables, soit à 100 % de points légèrement inconfortables. Ainsi le profil UCRES prend en compte, non seulement la fréquence, mais aussi l'intensité des différentes gênes rencontrées.

On présente ci-après des exemples de profil de confort UCRES dans le cas d'un chauffage réalisé par une insufflation d'air à 35 °C et un convecteur en allège : au niveau du confort thermique global, l'ambiance est uniforme ( $U = 0$ ), la température du sol n'est pas source d'inconfort ( $S = 0$ ), la gêne due au rayonnement froid se manifeste uniquement dans le cas d'un simple vitrage ( $R = -1$ ), des courants d'air chaud et des gradients de température engendrent des inconforts.

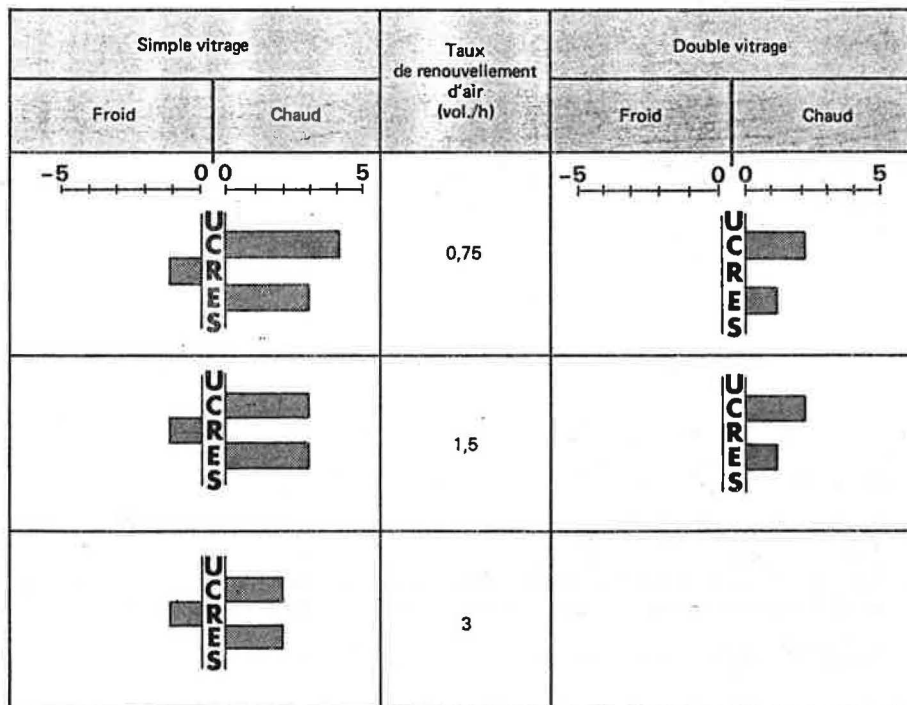


Figure 6 Exemples de profils de confort UCRES. Cas de l'air soufflé à 35 °C et du convecteur en allège

### 3,3 comportement aéraulique des bouches de soufflage en climatisation

Des expérimentations menées dans la cellule EREDIS représentative d'un bureau de  $3,6 \times 3,6 \times 2,5$  m ont permis d'apprécier dans quelle mesure il est possible d'utiliser la même bouche de soufflage pour desservir un réseau aéraulique devant fonctionner à la fois en régime de chauffage et de rafraîchissement [7].

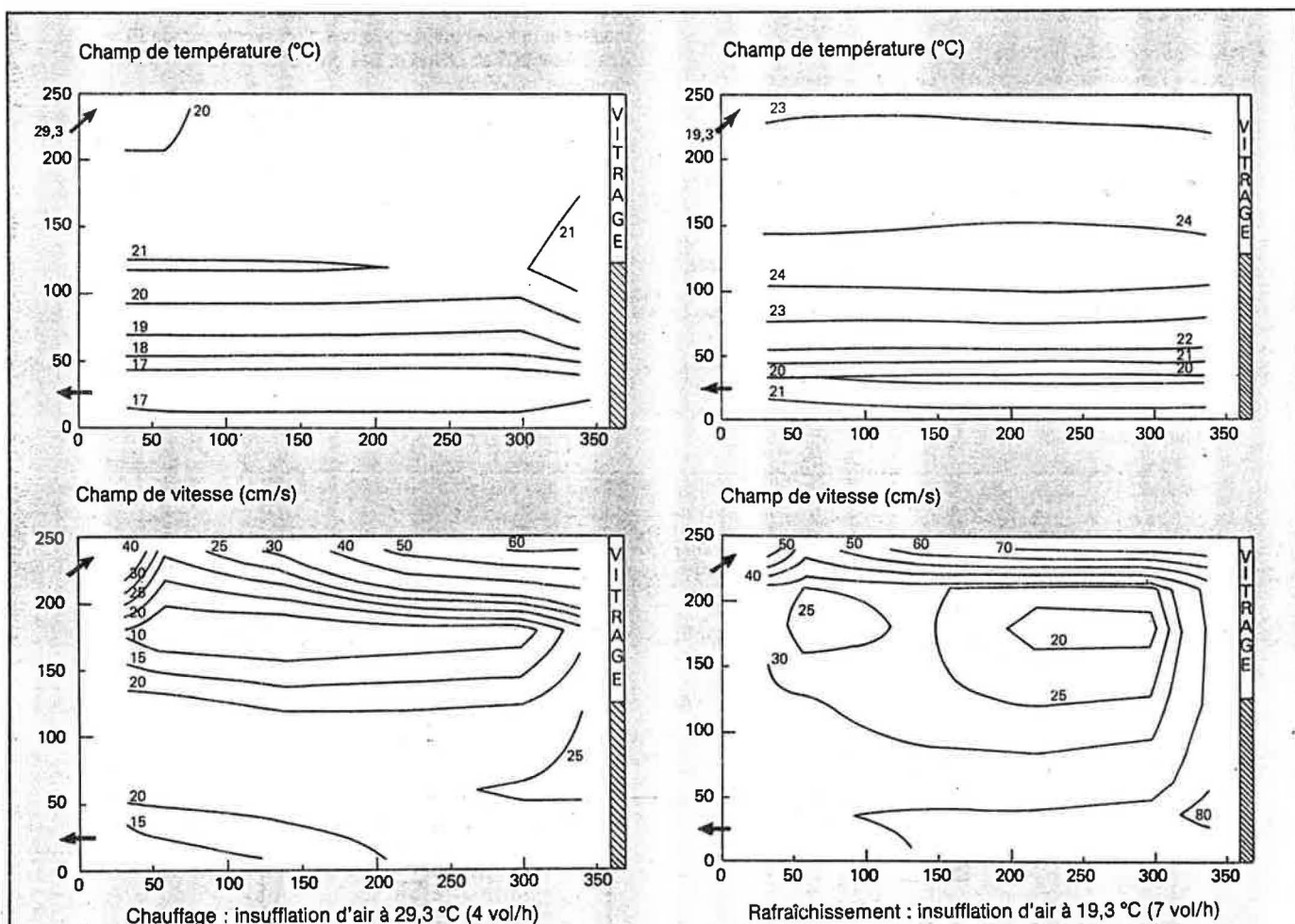
Les résultats des essais ont montré qu'il est possible, avec un même réseau aéraulique, d'assurer en hiver le chauffage des locaux avec un taux de renouvellement d'air de 4 vol/h et en été le rafraîchissement avec un taux de 7 vol/h, sans nuire aux conditions de confort (fig. 7).

### 3,4 étude des émetteurs de chaleur

Les différents émetteurs de chaleur ne sont pas équivalents tant du point de vue du confort thermique qu'ils procurent que des consommations énergétiques qu'ils induisent.

En effet, l'efficacité d'un émetteur n'est pas uniquement une caractéristique intrinsèque mais dépend aussi des caractéristiques du local dans lequel il est placé (isolation, dimension, etc.) et de sa position dans ce local.

C'est pourquoi un programme de recherche expérimental a été engagé afin d'améliorer la connaissance des échanges thermiques entre les émetteurs et le local en déterminant notamment les coefficients de convection et de rayonnement des parois [8].



**Figure 7** Cellule EREDIS : exemple de relevés de température et vitesse d'air dans le cas d'une insufflation de l'air par une bouche à fentes placée en partie haute sur la paroi opposée au vitrage avec reprise d'air en partie basse

(les vitesse et température d'air sont données dans le plan longitudinal médian)

Dans le cas du soufflage d'air chaud, le jet chemine le long du plafond puis s'épanouit au voisinage de la paroi ; on n'observe pas de couche d'air chaud en partie haute.

Dans le cas d'un rafraîchissement, le jet d'air, insufflé à une vitesse plus élevée, poursuit son mouvement pariétal en longeant le plafond, la paroi verticale et le plancher ; l'homogénéité des températures dans la zone d'occupation est satisfaisante.

Ont notamment été testés les planchers chauffants, les plafonds rayonnants, deux types de convecteurs électriques, trois types de radiateurs à eau chaude. Différentes bouches de soufflage pour le chauffage aéraulique vont être testées.

Les principaux paramètres étudiés sont :

- la température extérieure,
- la longueur du local,
- la dimension du vitrage,
- la position des émetteurs dans le local (en allège, en épi, contre la cloison arrière, ...).

Le niveau de confort thermique est apprécié grâce au profil UCRES déjà mentionné.

Les performances énergétiques sont évaluées à partir de mesures de consommation d'énergie ramenées à des conditions climatiques intérieures et extérieures de référence.

On donne à la figure 8 quelques exemples de champs de températures.

Les résultats déjà obtenus tant au CSTB que dans d'autres laboratoires (IPB de Liège, CETIAT, Action de Recherche Coordonnée du CNRS sur la convection naturelle) permettent d'ores et déjà de formuler quelques conclusions :

- les performances des différents systèmes sont d'autant plus proches les unes des autres, en valeur relative, que le bâtiment est mieux isolé ;
- les performances des émetteurs dépendent largement autant des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment que du système de chauffage ;
- une amélioration effective de la connaissance et du mode d'expression des performances des émetteurs nécessite encore d'importantes investigations à mener en collaboration avec les laboratoires concernés : le Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur (GREC) récemment constitué à l'initiative de l'AFME devrait constituer le cadre dans lequel s'organiseront ces actions de recherche.

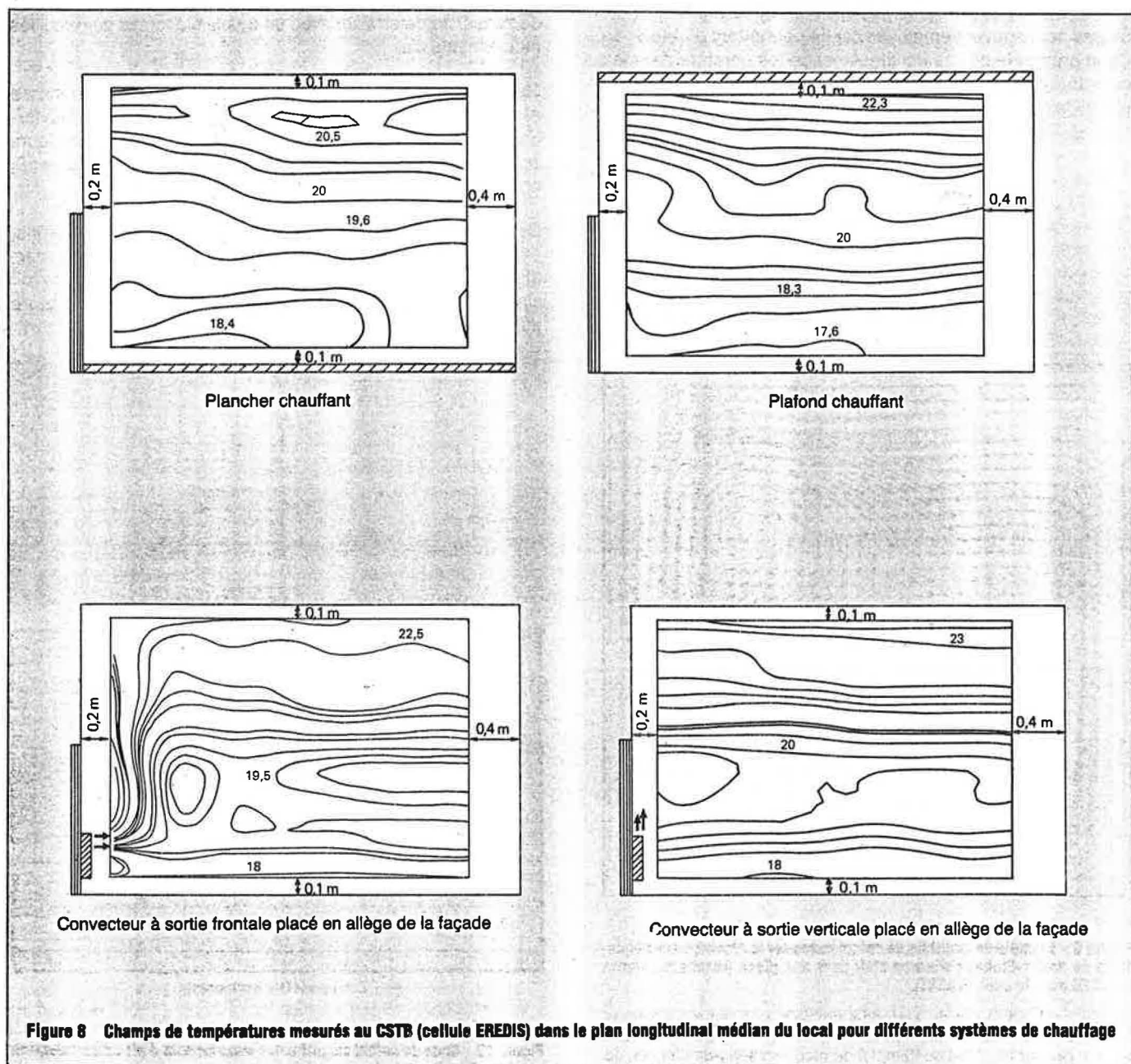


Figure 8 Champs de températures mesurés au CSTB (cellule EREDIS) dans le plan longitudinal médian du local pour différents systèmes de chauffage

Avec les chambres climatiques, et notamment la cellule EREDIS, on dispose d'outils expérimentaux permettant d'améliorer la connaissance des phénomènes thermoconvectifs à l'intérieur des locaux.

Toutefois, le nombre d'expérimentations à entreprendre pour appréhender les phénomènes est très élevé dans la mesure où ces derniers sont conditionnés par un grand nombre de paramètres. C'est pourquoi le recours aux simulations numériques peut permettre un développement plus rapide de la connaissance des phénomènes physiques régissant les mouvements et températures d'air dans les locaux. On peut, à cet égard, distinguer deux grandes classes de modèles :

a) les modèles basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes sont souvent employés car ils permettent d'obtenir de façon précise le champ de vitesse et de température dans les différents points du local. Ils présentent toutefois, dans leur état actuel de développement, deux types de limitation : d'une part,

ils sont très consommateurs de temps calcul (sur station de travail, la réalisation d'une seule simulation peut nécessiter, dans un cas moyen, plusieurs heures de temps CPU) ; d'autre part, ces modèles ne sont pas parfaitement rigoureux dans la mesure où il est tenu compte des phénomènes de turbulence par des lois semi-empiriques, dites « modèles de turbulence » susceptibles d'être plus ou moins adéquates (fig. 9) selon les cas traités. C'est la raison pour laquelle des travaux faisant appel à des méthodes élaborées (méthodes spectrales) ont été entrepris afin de développer des modèles permettant de s'affranchir des hypothèses concernant la turbulence ;

b) les modèles simplifiés, encore appelés « modèles zonaux », « modèles macro-volumes » ou « modèles aux volumes de contrôle » permettent, en divisant l'espace en un nombre limité de zones, de déterminer avec un très faible temps de calcul les mouvements d'air.

Généralement, ces modèles font appel aux équations de masse et d'énergie sans recours explicite aux équations de Navier-Stokes. Le volume à modéliser est alors divisé en plusieurs zones, par exemple, comme cela est représenté à la figure 10, en zones pariétales et centrales.

Des considérations thermiques et l'utilisation de corrélations, par exemple entre les nombres de Nusselt et Grashof, permettent de quantifier les échanges entre ces zones et prévoir ainsi, avec un faible temps de calcul, le champ de température dans le volume considéré.

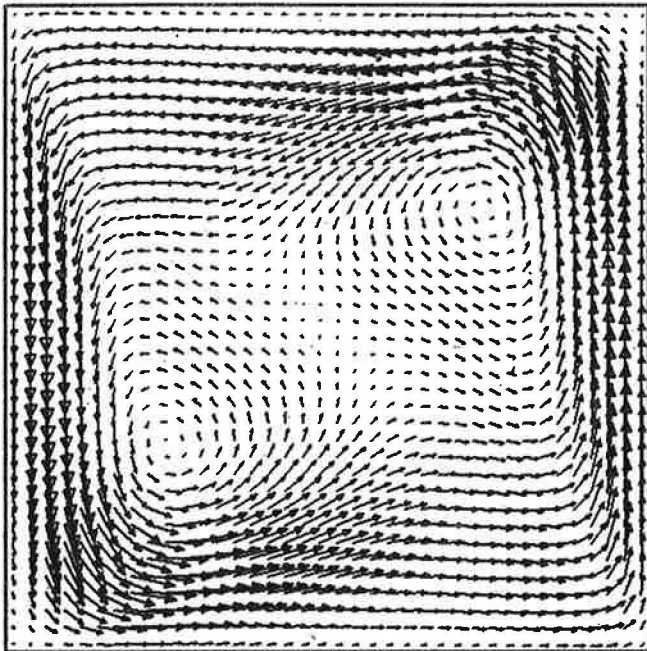


Figure 9 Exemple de résultats de calcul basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes : vitesses d'air dans une pièce (résultats obtenus au CSTB avec le code FLUENT).

Le cas traité est le cas du « window problem » où les mouvements d'air sont induits par les phénomènes de convection naturelle ; dans ce cas, l'erreur résultant de l'emploi de modèles semi-empiriques de turbulence est plus particulièrement importante

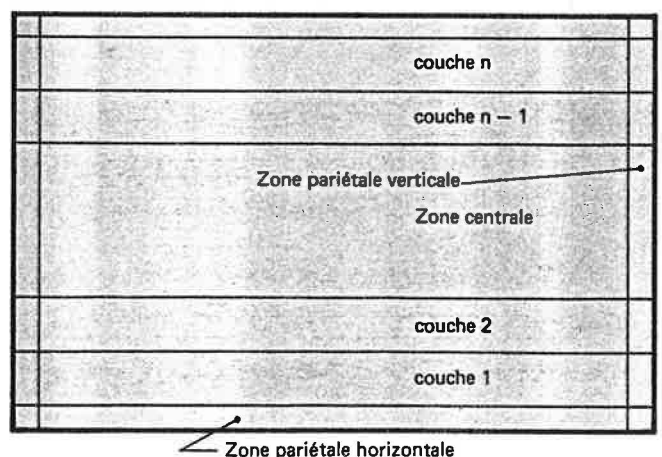


Figure 10 Code de calcul simplifié des mouvements d'air : discrétisation spatiale du volume du local

De tels modèles ont déjà fait l'objet de travaux de recherche approfondis parmi lesquels on peut citer la thèse d'Eric Hutter sur le comportement thermique des galeries couvertes [9]. Un code de calcul (code SIMAIR), basé sur ce modèle est en cours de réalisation au CSTB : la figure 11 présente un résultat de simulation concernant le cas simple d'une cavité à deux parois verticales à température donnée dit « window problem ». Les travaux se poursuivent de façon à traiter les cas plus complexes où il y a présence de jets d'air dus aux bouches d'insufflation ou de panaches créés par les émetteurs de chaleur.

A terme, les modèles simplifiés devraient permettre de traiter le problème des mouvements d'air à l'intérieur des locaux sans avoir recours à des moyens de calcul lourds. Ils demandent toutefois à être mieux validés, par comparaison à la fois avec des codes de calcul fins basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes, et avec des résultats expérimentaux obtenus sur des cellules telles que la cellule EREDIS.

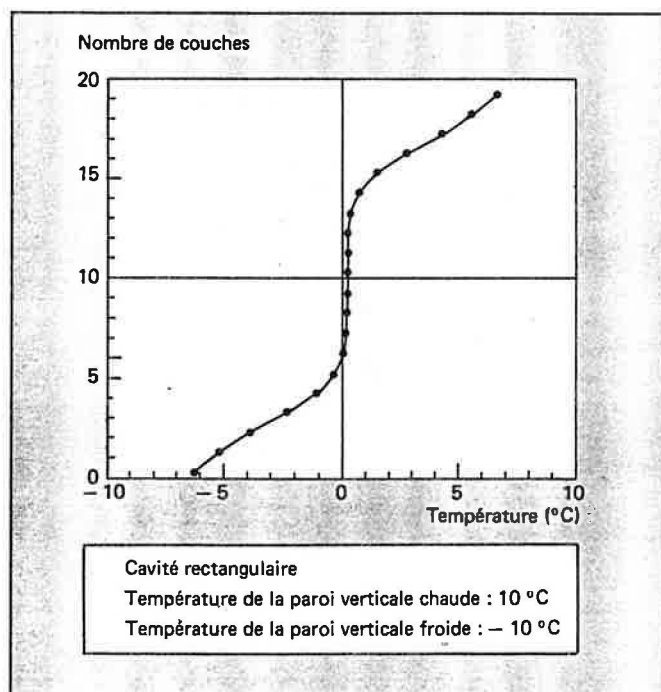


Figure 11 Code de calcul simplifié des mouvements d'air

Les codes de calcul simplifiés permettent, si l'on suppose connu le schéma général d'écoulement de l'air, de prévoir avec peu de temps calcul, les vitesses et températures d'air dans une pièce. On donne ici un exemple des résultats (profil vertical de température) obtenu avec de tels codes. Ces codes sont encore en développement, et il reste nécessaire d'évaluer précisément leur domaine de validité.

La cellule EREDIS est un outil expérimental qui permet d'améliorer la connaissance des phénomènes thermoconvectifs à l'intérieur des locaux.

Cette cellule, utilisée pour de nombreuses études expérimentales concernant les problèmes de diffusion d'air et de confort (entrées d'air en façade, bouches d'insufflation, émetteurs de chaleur), constitue par ailleurs un outil particulièrement adapté à la validation des codes de calcul des mouvements d'air, qu'il s'agisse des codes de calcul faisant appel aux équations de Navier-Stokes ou, dans une seconde étape, des codes dits simplifiés. Ces derniers codes, actuellement en cours de développement, paraissent particulièrement prometteurs dans la mesure où ils devraient permettre de traiter le problème des mouvements d'air à l'intérieur des locaux sans avoir recours à des moyens de calcul importants. On peut même envisager, en raison de leur simplicité, de les coupler à des codes de calcul des mouvements d'air entre les différentes pièces d'un même bâtiment, ce qui permettrait d'améliorer grandement la prévision, par ces codes, de mouvements d'air et concentration en polluants dans les bâtiments.

C'est dans ces perspectives que s'inscrivent les actions de recherche en matière de modélisation des mouvements d'air, actuellement engagées au CSTB. Pour les mener à bien, des collaborations ont été établies aussi bien avec nos partenaires français (INRS, CETIAT, Action de Recherche Coordonnée « convection naturelle » du CNRS, ...) qu'étrangers. C'est ainsi que l'action du CSTB en matière de mouvements d'air intérieurs au bâtiment est menée en collaboration avec une action de recherche de l'Agence Internationale de l'Énergie : l'annexe 20 « Air flow patterns within buildings » du programme de recherche « Energy Conservation in Buildings ».

## bibliographie

1. RIBERON J., « Contribution expérimentale à l'étude de la diffusion de l'air dans un local », Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Université P. et M. Curie, Paris, mars 1983.
2. REGEF A., « Quel confort pour quelles performances ? », *CSTB Magazine* n° 14, mai 1988.
3. RIBERON J., « Une nouvelle chambre climatique au CSTB : application à l'étude de la gêne due aux entrées d'air en façade », *CSTB - TEA 1*, n° 2087, mai 1983.
4. MARRET D., « Étude expérimentale sur la diffusion de l'air dans un local », *CSTB - CTBE* n° 84-3241, mars 1985.
5. DESSAGNE J.-M., « Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique : le profil de confort UCRES », *Clima 2000*, vol. 4, Indoor Climate, Copenhague, 1985.
6. REGEF A., RIBERON J., « Comportement d'un jet d'air chaud dans un local », *CSTB - GEC* n° 88-4372 b, août 1988.
7. VILLENAVE J.-G., de SAINT-AUBERT M., « Étude expérimentale de bouches d'insufflation en chauffage et en rafraîchissement », *CSTB - GEC* n° 89-4763, juin 1989.
8. BOURHIM H., HUTTER E., REGEF A., « Étude des transferts thermiques dans un local », *CSTB - GEC* n° 87-3951, mai 1987.
9. HUTTER E., « Étude du comportement thermique des galeries couvertes par simulation en régime varié avec prise en compte de la stratification de l'air », Thèse de docteur-ingénieur, Université Paris VII, décembre 1981.
10. RIBERON J., HUTTER E., « Study of thermoconvective phenomena inside rooms », Workshop CIB W67, Sophia Antipolis, April 1989.
11. DESSAGNE J.-M., « Une application de la thermoanémométrie basse vitesse : la caractérisation de l'ambiance thermique d'un local », *Rencontres SFT 84*, Toulouse, 28-29-30 mai 1984.