

Transferts d'air entre pièces

par R. PELLETRET et H. KHODR (*)

1. Contexte

Engagée dès 1986, cette recherche vise principalement à chiffrer l'influence de la prise en compte de la configuration interne des bâtiments sur les performances énergétiques de composants, soit de systèmes de chauffage, soit d'enveloppes.

Jusqu'à ces dernières années, ces performances étaient évaluées à l'aide de *modèles monozones de bâtiments*. Cela supposait une température intérieure unique et une répartition uniforme des puissances dissipées (apports solaires, apports internes, pertes des systèmes...).

Prendre en compte le partitionnement réel des bâtiments conduit à considérer des disparités de températures et en particulier des surchauffes, localement plus importantes, qu'avec une hypothèse de monozone. Cela influe bien évidemment sur le taux de récupération des puissances libérées [1 à 4].

Pour évaluer avec précision les performances thermiques des composants de systèmes ou d'enveloppes, considérés dans un environnement de bâtiment multizone, il faut modéliser aussi correctement que possible les transferts thermiques entre zones. La difficulté principale réside dans la modélisation des transferts thermiques dus aux transferts aérauliques. Pour calculer avec précision les transferts aérauliques entre zones, il paraît a priori logique d'utiliser un modèle basé sur un calcul des champs de pressions. Cependant, pour un usage *thermique* (but unique du modèle : calcul des conductances thermiques connexes des transferts aérauliques entre zones), ce type de modèle aéraulique est trop complexe. En effet, son utilisation conduit à des temps de calcul longs, incompatibles avec toute simulation sur une saison de chauffe (et même parfois ces modèles induisent des difficultés numériques qui se traduisent par des divergences entre algorithmes) [5 et 6].

Un nouveau modèle, adapté aux calculs thermiques, a été imaginé. Le champ d'application de ce nouveau modèle est défini relativement à une classification de l'ensemble des modèles aérauliques (cf. §.2.1). L'architecture en est décrite au paragraphe 2.2). Pour valider ce nouveau modèle, une expérience

a été conçue ; ses principes sont rappelés au paragraphe 3. Nonobstant l'objectif principal du nouveau modèle, celui-ci peut être utilisé pour effectuer des calculs de débit d'air entre zones ; cependant, le modèle ne s'applique pas si le système de chauffage est à air pulsé ou s'il s'agit d'un système de climatisation (cf. §.4). De plus, le champ d'application est limité aux cas où il n'existe dans l'ouverture qu'une seule zone neutre. Au paragraphe 5, quelques exemples d'écoulement avec double zone neutre sont traités ; ils mettent en évidence les limites du modèle.

2. Architecture d'un modèle aéraulique de classe C2

2.1. Classification des modèles aérauliques

Une classification entre les différents modèles aérauliques a été envisagée. Elle différencie les modèles en fonction de leur champ préférentiel d'application. Les différentes classes sont les suivantes :

— *classe C1* : ensemble des modèles à scénarios prédéfinis (distribution des débits d'air entre zones imposée et figée durant toute une simulation) ;

— *classe C2* : modèles fins avec prise en compte à chaque pas de temps des variations des champs de températures mais sans calcul des champs de pressions ;

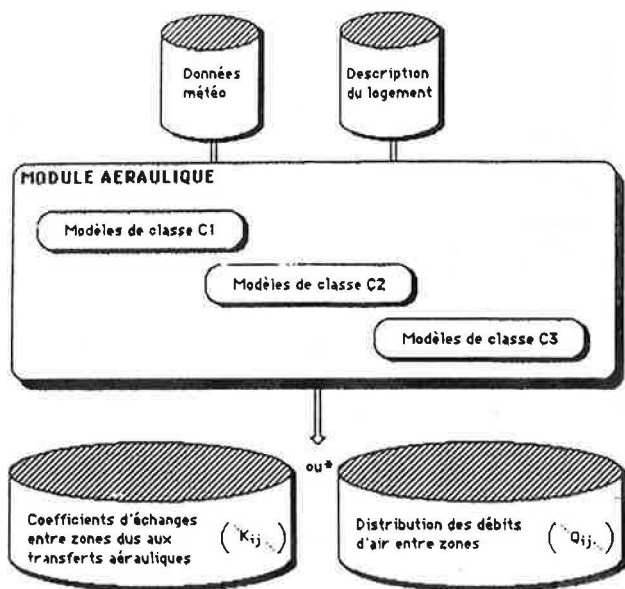
— *classe C3* : modèles fins basés sur un calcul, à chaque pas de temps, des champs de pressions.

Les modèles de classe C1 sont les modèles aérauliques les plus simples. Leur champ d'application est strictement celui des codes de calculs thermiques. Dans ce type de modèle, la distribution des débits d'air entre zones (y compris avec l'extérieur) est définie avant toute simulation dynamique. Cette distribution peut être soit fixée arbitrairement par l'utilisateur du logiciel, soit calculée par un modèle de classe C2 ou C3. Quoiqu'il en soit, la distribution reste figée tout au long de la simulation ; tout au plus est-il possible de définir des scénarios temporels.

Les modèles de classe C2 sont préférentiellement adaptés aux codes de calculs de la thermique du bâtiment. Néanmoins, sous certaines conditions, ils peuvent être utilisés pour effectuer des calculs de débits d'air. C'est dans cette catégorie que s'inscrit le nouveau modèle proposé. Ce type de modèle permet un calcul assez précis, à chaque pas de temps, des

(*) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Etablissement de Sophia-Antipolis, BP 141, 06561 Valbonne Cedex.

Article reçu le 11.07.1989, accepté le 27.10.1989.



* Utilisation d'un modèle de classe C2 ou C3

Fig. 1. — Module aéraulique

conductances thermiques résultantes des mouvements d'air.

Les modèles de classe C3 s'appliquent en priorité aux calculs fins des débits d'air entre zones (y compris avec l'extérieur). Ils permettent en théorie de prendre en compte les effets du vent, des températures extérieure et intérieure, les systèmes de ventilation, etc. Des modèles de ce type sont actuellement utilisés dans les codes de simulation ⁽¹⁾ de la thermique du bâtiment pour calculer en fait des conductances thermiques.

En conclusion de cette présentation d'une typologie des modèles aérauliques, il apparaît qu'un *module aéraulique complet* (cf. figure 1) devrait comprendre les trois types de modèles afin d'offrir aux utilisateurs des codes de calcul des possibilités variées, adaptées à leurs besoins spécifiques.

2.2. Architecture d'un modèle de classe C2

Au sens d'un calcul des performances thermiques sur toute une saison de chauffe, prendre en compte la variation instantanée des débits de renouvellement d'air apparaît comme secondaire par rapport à la prise en compte de l'influence des transferts internes. Aussi, des valeurs moyennes pour les débits de renouvellement d'air sont-elles suffisantes pour l'objectif visé. Eventuellement, on pourra distinguer le cœur de la saison de chauffe et les demi-saisons (dans le cas où une analyse climatique conduirait à définir des régimes moyens de vent assez différents et si la mauvaise étanchéité de l'enveloppe ou le mode de fonctionnement de la ventilation le justifiait). Bien entendu, tout scénario temporel journalier pour la ventilation spécifique est envisageable (par

exemple, celui des conventions unifiées pour le calcul du coefficient B).

Le modèle aéraulique doit donc comporter un préprocesseur de calcul des valeurs moyennes des débits de renouvellement d'air par zone et des débits entre zones qui en résultent. Ces calculs peuvent être effectués à l'aide d'un modèle de classe C3 en supposant que toutes les zones sont à la même température. Avec cette dernière hypothèse, les modèles actuels convergent en général sans problème et les calculs demandent peu de temps. Le préprocesseur effectue autant de calculs de distribution des débits d'air qu'il y a de configurations internes possibles (c'est-à-dire de combinaisons des différentes possibilités d'ouverture et de fermeture des portes de communication entre zones).

Au final, les résultats sont traduits sous forme de conductances thermiques entre zones, dues aux renouvellements d'air, notées K_{lm} . La relation qui lie la valeur d'une conductance à celle d'un débit est $K = C_p Q$ ⁽²⁾. Une matrice penta-dimensionnelle est initialisée avec les valeurs, calculées a priori, des conductances. Cette matrice est notée $D(i, j, k, l, m)$.

L'indice i repère les périodes de l'année ($i = 1$ ou 2) :

- $i = 1$: l'étanchéité à l'air des enveloppes est bonne, la vitesse et la direction du vent n'ont pas d'influence sur le taux de renouvellement d'air ; le calcul est effectué sur l'année (une seule période) ;
- $i = 2$: mauvaise étanchéité d'enveloppes, distinguer deux périodes de l'année selon les régimes du vent (vent fort-vent faible).

L'indice j repère les périodes du scénario temporel journalier ; en général, $j = 2$ (si l'on considère le scénario des conventions unifiées, cela implique qu'il faudra calculer les distributions des débits avec deux valeurs des débits de VMC, une valeur maximale et une valeur minimale).

L'indice k repère les différentes configurations. La valeur maximale de cet indice dépend du nombre de zones, des communications entre zones et des possibilités de modifier ces communications (ouverture ou fermeture des portes).

Les indices l et m repèrent les zones de part et d'autre de l'ouverture considérée, l'extérieur étant, par convention, repéré par l'indice 0.

Cette phase d'initialisation terminée, les calculs en dynamique peuvent débuter. Les échanges aérauliques entre zones sont dus au renouvellement d'air et aux *différences de températures*. Les conductances dues au renouvellement d'air sont extraites de la matrice D . Les conductances dues aux différences de températures entre zones sont calculées par un modèle simplifié, par exemple une relation $Nu = f(Gr, Pr)$ ⁽³⁾. Ce type de modèle conduit à définir une conductance dépendante entre deux noeuds représentatifs de deux zones contiguës.

La conductance globale entre zones est calculée à l'aide d'un *modèle de couplage* simple de classe C2 dont l'architecture est représentée sur la figure 2.

(1) CSTBAT : Code de Simulation de la Thermique du Bâtiment (CSTB Sophia-Antipolis, France) et ESP : Environmental Systems Performance (University of Strathclyde, Department of Architecture, Glasgow. UK).

(2) C_p est la capacité thermique massique de l'air (en $J.kg^{-1}.K^{-1}$). Q est le débit massique entre zones (en $kg.s^{-1}$).

(3) Nu nombre de Nusselt. Gr nombre de Grashof. Pr nombre de Prandtl.

Les points clés

Le modèle aéralique de classe C2 comporte plusieurs modèles qui peuvent être définis indépendamment les uns des autres. Il s'agit :

- d'un modèle de calcul des coefficients de décharge des ouvertures ;

- d'un modèle de calcul des distributions des conductances thermiques dues au renouvellement d'air ;

- d'un modèle de calcul des conductances thermiques dues aux différences de températures entre zones ;

- d'un modèle de couplage entre conductances thermiques dues, d'une part, au renouvellement d'air et, d'autre part, aux différences de températures entre zones.

Ces différents modèles sont détaillés dans [7].

Pour déterminer les paramètres de ces modèles, une expérimentation, complémentaire de celles déjà réalisées par ailleurs [8 et 9], a été définie et des expériences sont en cours. Elle est présentée ci-après (cf. § 3).

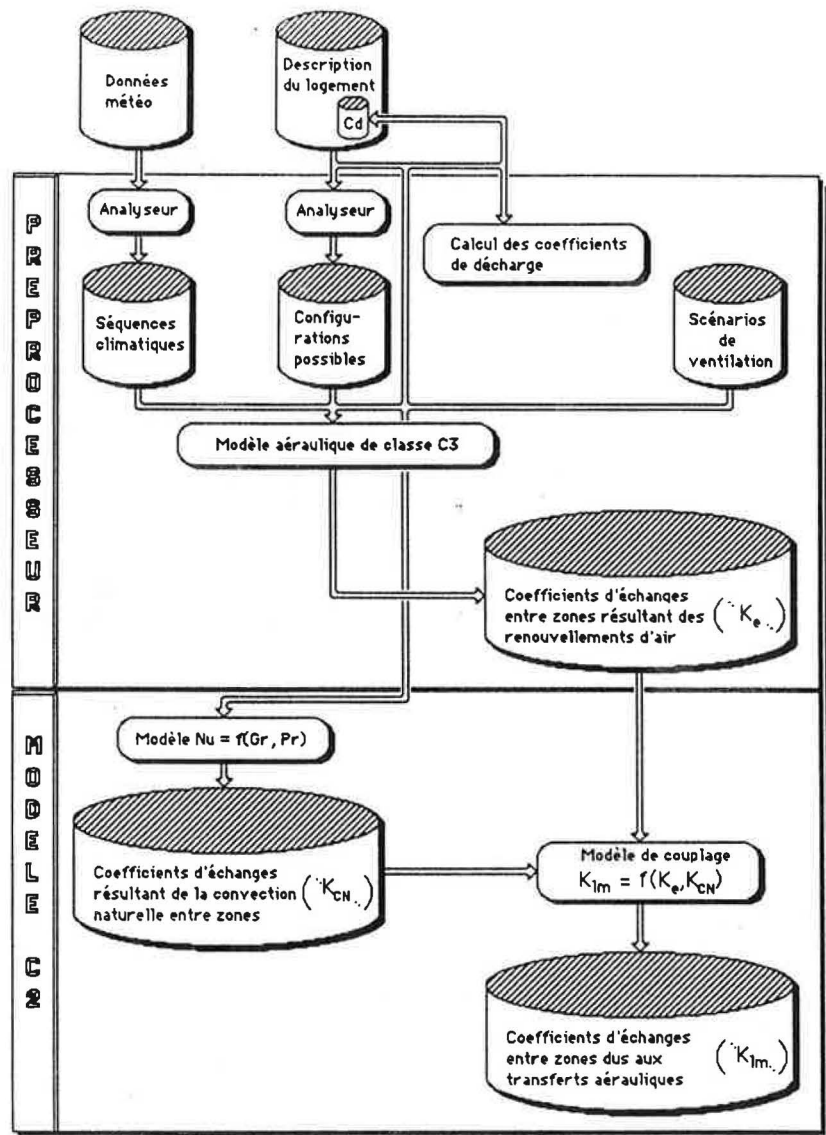


Fig. 2. — Architecture d'un modèle aéralique de classe C2

3. Expérimentation

3.1. Description

Cette expérimentation prend place dans les zones Sud et Sud-Est de la cellule DESYS construite sur le site du CSTB à Sophia-Antipolis. La cellule DESYS est décrite en détail dans le document [10].

Les deux zones sont séparées par une cloison qui comporte une ouverture de dimensions variables. Le réseau aéralique comporte un extracteur et une entrée d'air. On assure le chauffage d'une zone par des convecteurs électriques et le refroidissement d'une autre par un climatiseur (un changement du système de chauffage est envisageable).

L'instrumentation est la suivante :

- vingt-six sondes platine mesurent la température de l'air dans les deux zones ; chaque zone comporte treize sondes placées sur cinq verticales et distribuées sur cinq couches horizontales ;
- vingt trois sondes platine mesurent les tempéra-

tures superficielles des faces internes des parois ;

- les débits entrant et sortant sont mesurés par des appareils dits *convergen-divergents* ;

- les profils de vitesses et de températures dans l'ouverture sont mesurés par neuf sondes anémométriques omnidirectionnelles (marque Dantec, type 54R10) ; ces sondes sont montées sur une canne mobile dans l'ouverture (cf. figure 3).

On mesure également la température extérieure, la vitesse du vent et l'ensoleillement sur un plan vertical sud.

L'acquisition des données s'effectue à l'aide :

- d'une centrale d'acquisition HP3497A et son extension HP3498A pour les mesures des températures, des débits, ainsi que pour commander la canne (arrêt ou mise en marche, test de l'état de fonctionnement) ;

- d'un mesureur multivoies Dantec 54N10 où sont branchées les sondes omnidirectionnelles ;

- d'un micro-ordinateur HP85 qui gère l'ensemble du système.

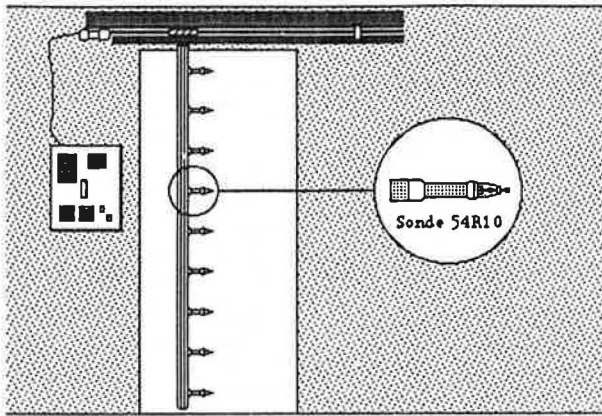


Fig. 3. — Montage des sondes anémométriques dans l'ouverture entre les deux zones

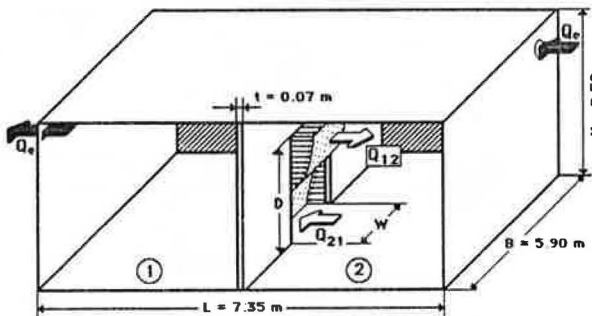


Fig. 4. — Configuration des expérimentations

3.2. Les variables expérimentales

Les expériences visent à déterminer le flux de chaleur qui transite entre deux zones (cf. figure 4) lorsque diverses conditions s'appliquent. Le flux peut être calculé, soit à partir des profils de vitesses et de températures directement mesurés dans l'ouverture, soit par bilan thermique.

Les différentes conditions applicables sont :

- flux de chaleur imposés dans les deux zones : ils sont modulés en fonction des conditions extérieures afin d'obtenir une différence de températures entre zones qui varie dans une certaine gamme (ces flux peuvent être positifs — cas d'une zone chauffée — , négatifs — cas d'une zone climatisée — ou nuls — absence de système) ;
- système : la façon dont les flux sont libérés dans les deux zones peut influencer le transfert de chaleur (utilisation des convecteurs électriques ou d'un plancher chauffant) ;
- VMC (un débit fixe de renouvellement d'air peut être introduit dans une zone ; il est extrait dans l'autre) ;
- dimensions de l'ouverture (la taille de l'ouverture entre les deux zones peut varier de quelques cm^2 jusqu'à plus de 2 m^2).

4. Résultats et implications sur la qualité de l'air

Les premières expérimentations ont permis de valider un modèle de calcul des conductances thermiques dues uniquement, au début, à la convection naturelle entre zones pour une ouverture standard.

Ce modèle [relation $Nu = f(Gr, Pr)$] utilise comme grandeurs caractéristiques la hauteur⁽¹⁾ de l'ouverture (D) et l'écart des températures moyennes des zones. Le domaine de validité est $1,8 \cdot 10^9 < Gr_D < 2,5 \cdot 10^9$ et $D/H^{(2)} \geq 0,84$; de plus, le modèle est à employer avec prudence lorsque le système de chauffage ou de climatisation est à air pulsé. Il vient :

$$Nu_D = 0,4 Gr_D^{0,5} Pr$$

L'intérêt de ce modèle, comparé aux modèles précédents du même type, est qu'il utilise comme écart caractéristique de températures un écart aisément accessible dans tous les codes de calcul (alors que bien souvent, pour des raisons expérimentales — maquettes où deux murs opposés sont portés à des températures différentes — , les modèles de ce type utilisent l'écart entre les températures moyennes des murs opposés).

Ce modèle peut permettre une évaluation rapide des débits d'air entre zones dès lors que les températures moyennes sont connues et que les profils de températures dans les zones sont quasi-linéaires (sans toutefois induire un phénomène de double zone neutre dans l'ouverture ; la zone neutre est le lieu où les pressions de part et d'autre de l'ouverture sont égales, la vitesse de l'air dans cette zone est nulle.)

Pour étudier la relation *profils de températures - débits massiques*, un modèle de classe C3 est utilisé (ce modèle est décrit en annexe 3 de [7]) ; ce modèle peut prendre en compte n'importe quels profils de températures dans les zones. Si à l'aide de ce modèle, il est prouvé que dans certains cas les profils de températures n'ont pas d'influence sur la valeur des débits échangés, alors un modèle de classe C2 est utilisable pour le calcul des débits. Sinon, il ne l'est pas. Ces calculs sont étayés par des mesures réalisées à l'intérieur de la cellule DESYS.

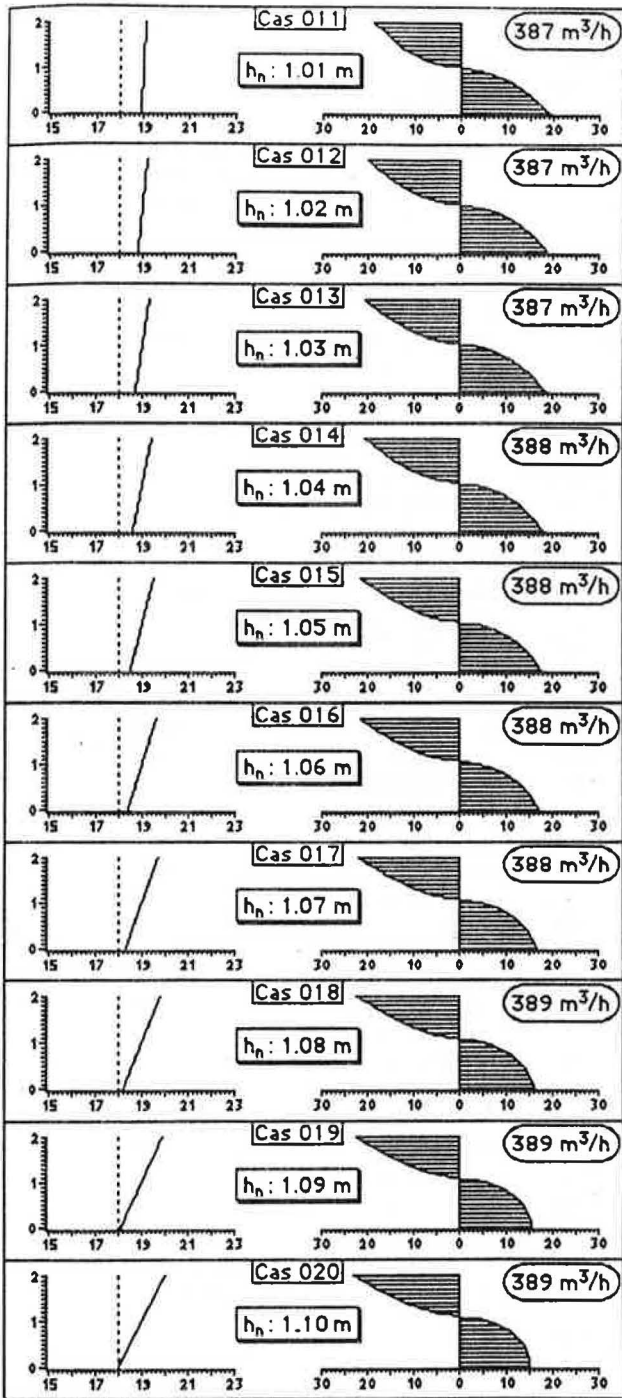
Par exemple, dans une ouverture de dimensions standards ($w = 0,90 \text{ m}$ et $D = 2,00 \text{ m}$), on montre que, pour certains profils de températures, il y a quasi-indépendance entre les gradients et le débit résultant dans l'ouverture (cf. figure 5).

En revanche, si les profils de températures sont quelconques, le modèle ne peut plus être utilisé pour calculer des débits massiques. C'est ce que les mesures effectuées dans la cellule DESYS ont montré (cf. figure 6).

A l'examen des deux graphiques de la figure 6, on note que le nuage de points représentatifs de la dépendance du flux de chaleur en fonction de l'écart de température $\Phi = f(\Delta T)$ est relativement resserré alors que celui représentatif de la dépendance du débit volumique $Q = f(\Delta T)$ est beaucoup plus éparé. Ce qui signifie que, pour un même écart des températures moyennes, les débits transitant entre les zones peuvent être très divers (cela est dû aux différents gradients de températures à températures moyennes identiques) mais que les flux de chaleur correspondants sont invariants (on obtient, pour un écart de température de $2,47 \text{ }^\circ\text{C}$, un écart relatif sur

(1) Toutes les recherches antérieures concordent sur la faible dépendance de la densité de flux de chaleur en fonction de la largeur de l'ouverture (w). C'est pourquoi nous n'avons pas étudié l'influence de ce paramètre.

(2) H est la hauteur sous-plafond de la cellule.



On considère deux pièces étanches par rapport à l'environnement extérieur.

La température de la pièce 1 est représentée par le trait pointillé, la température de la pièce 2 par le trait plein (cf. parties gauches des figures).

Dans cette séquence, la température de la pièce 1 est invariante et égale à 18 °C. Le gradient de la température dans la pièce 2 augmente ; au début (cas 011), il vaut 0,1 °C/m ; à la fin (cas 020), il vaut 1 °C/m.

La zone neutre (notée h_n) est au-dessus de l'axe médian de l'ouverture. Elle s'écarte de plus en plus de cet axe au fur et à mesure que le profil des températures dans la pièce 2 s'accroît.

Le débit d'air (les débits massiques dans les parties haute et basse de l'ouverture sont égaux) varie très peu bien que le gradient de température soit nettement différent entre les cas 011 et 020, cela car les profils de température sont linéaires. Il en irait tout autrement avec des profils quelconques.

Fig. 5. — Echanges d'air entre zones en fonction des gradients verticaux de températures

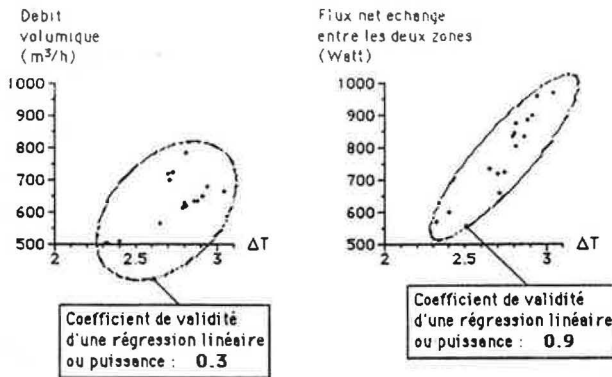


Fig. 6. — Flux de chaleur (Φ) et débits d'air (Q) en fonction de l'écart entre les températures moyennes des zones

le débit volumique de 23 % ; en revanche, l'écart sur le flux est de l'ordre de 5 %). Autrement dit, les flux de chaleur ne dépendent pas des gradients de températures mais seulement des températures moyennes des zones alors que les débits massiques, en toute rigueur, dépendent des gradients verticaux de températures [comme il a été montré ci-avant (cf. figure 5), cette dépendance est très faible si les gradients sont linéaires et s'il n'existe qu'une seule zone neutre].

Cas d'une double zone neutre

Même pour certains profils de température linéaires, un modèle de classe C2 peut ne pas être utilisable pour calculer les débits massiques. C'est le cas dès lors que plusieurs zones neutres existent dans l'ouverture.

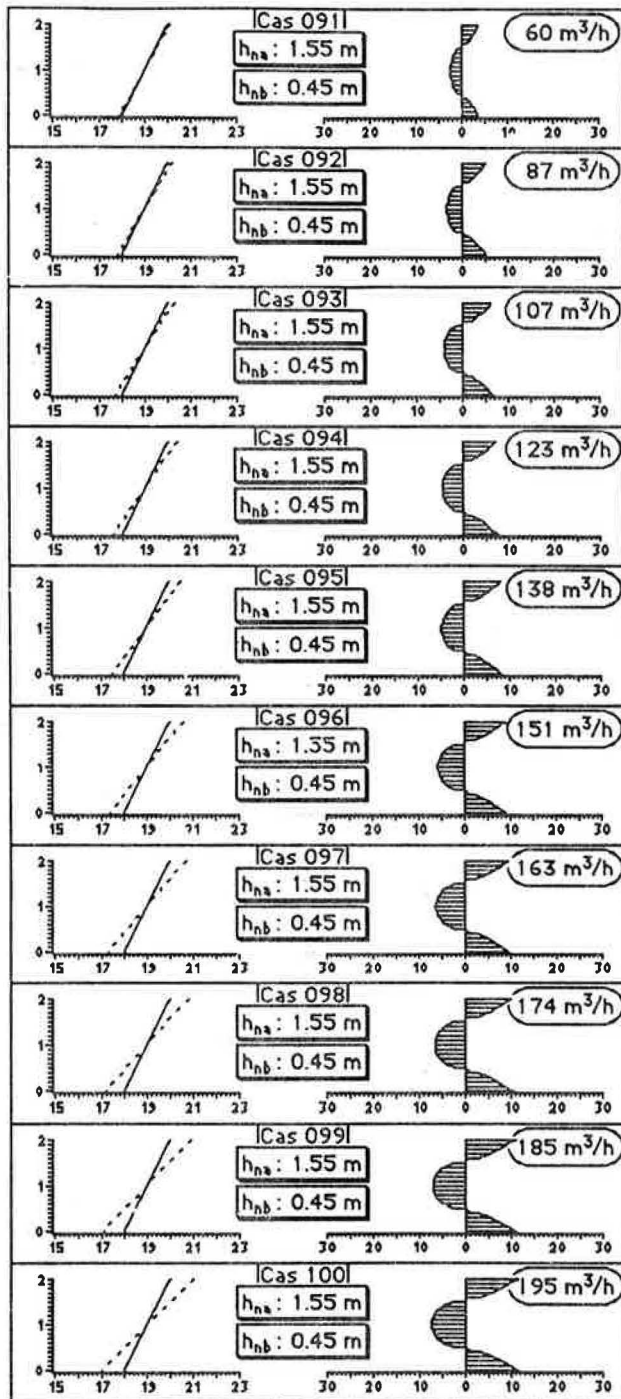
Considérons le cas simple d'une double zone neutre, illustré par la figure 7.

Sur cet exemple, il est clair que, bien que les profils de températures soient linéaires, il n'est pas possible d'extrapoler la valeur du débit échangé entre les deux zones à partir d'un modèle de classe C2. De plus, pour que ce débit soit calculable à partir d'un modèle de classe C3, il faudrait que celui-ci puisse prendre en compte les stratifications en températures dans les deux zones et qu'un modèle de calcul tel celui exposé en annexe 3 de [7] soit utilisé.

5. Conclusions

Les débits d'air, à travers de grandes ouvertures, induits par les différences de températures entre zones, atteignent des valeurs très élevées en comparaison des valeurs de débits dus aux infiltrations et/ou au système de ventilation. *A titre d'exemple, à travers une porte standard, un dixième de degré d'écart entre les températures moyennes des zones suffit pour créer une circulation d'air d'environ 120 m³/h ; un degré d'écart induira une circulation d'environ 390 m³/h* (valeurs obtenues à l'aide d'un modèle de classe C3). Pour ce qui concerne la diffusion des polluants, il s'agit d'un phénomène prépondérant qui doit être pris en considération.

Pour modéliser ce phénomène, des modèles simplifiés (classe C2) peuvent parfois être utilisés. Un tel modèle a été conçu et est en partie validé. Son champ d'application pour le calcul des débits massiques entre zones est limité aux cas où les gradients de températures dans les zones sont quasi linéaires



Dans cette séquence, la température de la pièce 2 (trait plein) est invariante (égale en moyenne à 19°C, avec un gradient de 1°C/m).

La température de la pièce 1 (trait pointillé) est constante en moyenne (19°C aussi) mais le gradient de température dans cette pièce augmente (de 1,1°C/m pour le cas 091 à 2°C/m pour le cas 100).

Une double zone neutre apparaît dans l'ouverture. Bien que les températures moyennes soient égales, les débits échangés entre les zones ne sont pas nuls. Ils dépendent même du gradient de températures dans les deux zones.

Fig. 7. — Echanges d'air entre zones avec phénomène de double zone neutre

et à condition qu'il n'existe pas de double zone neutre. Un modèle de classe C3 a montré que, s'il existe une double zone neutre dans l'ouverture (cas qui peut se produire avec des profils très simples), les débits massiques échangés entre zones peuvent être très importants bien que les températures moyennes des zones soient identiques (par exemple, environ 200 m³/h à travers une ouverture standard pour des températures moyennes identiques — 19°C — mais des gradients respectifs de 1°C/m et 2°C/m).

Si un modèle de classe C2 ne peut être utilisé, il faut avoir recours à un modèle de classe C3 (basé sur un calcul complet des champs de pressions). Encore que, pour être tout à fait précis, les modèles de classe C3 doivent tenir compte des éventuelles stratifications en température des différentes zones. Ce qui est tout à fait possible si les températures sont des paramètres et non des variables, mais beaucoup plus complexe si les profils de températures sont des inconnues du problème.

En outre, l'étude expérimentale en cours se poursuit. Elle devrait s'attacher, à court terme, à valider un modèle de calcul du coefficient de décharge des grandes ouvertures et, au-delà, à apporter des éléments de réflexion sur les limites de l'utilisation pertinente de ce coefficient couramment utilisé. Les résultats obtenus feront l'objet d'articles ultérieurs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PELLETRET (R.). — *Les transferts internes en thermique du bâtiment*. Rapport CSTB/ECTS/86-408, juin 1986.
- [2] BOURDEAU (L.) et PELLETRET (R.). — *Influence of internal heat transfers on the recovery of solar and internal gains*. Communication/CIB W 67, Lisbonne (Portugal), juin 1986.
- [3] PELLETRET (R.). — *Internal heat transfers and heating needs of buildings*. Communication/European Conference on Architecture, Munich (RFA), avril 1987.
- [4] PELLETRET (R.). — *Internal heat transfers and heating needs of buildings*. Communication/International Congress on Building Energy Management, Lausanne (Suisse). 28 septembre - 2 octobre 1987.
- [5] PELLETRET (R.). — *Les transferts internes en thermique du bâtiment*. Rapport CSTB/TTA-DPE/87-500, août 1987.
- [6] PELLETRET (R.) et KHODR (H.). — *Transferts aérodynamiques entre zones*. Communication/Groupe de travail Ventilation et Renouvellement d'air, Séminaire AFME Sophia-Antipolis (France), 17-18 novembre 1987.
- [7] PELLETRET (R.) et KHODR (H.). — *Les transferts internes en thermique du bâtiment*. Rapport CSTB/TTA-DPE/88-630, août 1988.
- [8] LAMRANI (A.). — *Transferts thermiques et aérodynamiques à l'intérieur des bâtiments*. Thèse de 3^e cycle, Université de Nice, mars 1987.
- [9] BARAKAT (S.A.). — *Inter-zone convective heat transfer in buildings: a review*. ASME-AICHE National heat transfer conference - Denver, CO, août 1985, Heat transfer in building and structures - HTD Vol.41, p. 45-52.
- [10] PELLETRET (R.). — *La cellule DESYS*. Rapport CSTB/TTA-DPE/87-478, août 1987.

