L. Laret (\*) J. Lebrun (\*\*) D. Marret (\*\*\*) P. Nusgens (\*\*\*\*)

# ETUDE EXPERIMENTALE SUR L'EFFICACITE **DE LA VENTILATION MECANIQUE CONTROLEE** DANS UN LOCAL D'HABITATIÓN

# 1. INTRODUCTION

Cette étude fait partie de la recherche « Circuits aérauliques - ventilation mécanique contrôlée » subventionnée par l'I.R.S.I.A. à l'intervention du Syndicat IC-IB.

Elle a été effectuée de juillet 1975 à mai 1976 à l'Institut de Thermodynamique de l'Université de Liège.

Son objet principal était de déterminer la « qualité du balayage » dans un local d'habitation.

Septante-cinq essais ont été réalisés dans la chambre climatique qui avait servi précédemment pour la recherche sur le confort thermique (1974-1975) également subventionnée par l'I.R.S.I.A. à l'intervention du Syndicat IC-IB (\*\*\*\*\*).

L'installation a été complétée notamment par un appareillage de mesure de la concentration en gaz traceur CO<sub>3</sub>.

La méthode expérimentale et les résultats obtenus sont décrits de façon plus détaillée dans le rapport de recherche (\*\*\*\*\*\*) et dans un article (\*\*\*\*\*\*\*) publiés par la Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège.

# 2. ENONCÉ DU PROBLEME

En principe, pour une installation de ventilation mécanique contrôlée, on a la possibilité de choisir les modalités de soufflage (position de la bouche, orientation et vitesse initiale de l'air) et de reprise (position de la bouche). Ce choix doit permettre de satisfaire les exigences de confort thermique et d'atteindre la meilleure efficacité de renouvellement d'air.

# 2.1 Exigences de confort thermique

Il faut éviter tout risque de gêne locale, c'est-àdire pratiquement tout risque de pénétration du jet d'air neuf dans la zone d'occupation. L'évaluation de ce risque peut être faite à partir des mesures de températures et de vitesses d'air, qui permettent de déterminer une température équivalente d'égal échange (\*\*\*\*\*).

# 2.2 Efficacité du renouvellement d'air

Pour une contamination donnée de l'ambiance intérieure, il s'agit soit de maintenir la concentration en contaminant en dessous du maximum admissible avec un renouvellement d'air minimal, soit de « purger » le plus rapidement possible la zone d'occupation avec un débit d'air

<sup>(\*)</sup> Assistant à la Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.

 <sup>(\*)</sup> Assistant à la Faculte des Sciences Appliquées, Université de Liège.
 (\*\*) Maître de Conférences à la Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.
 (\*\*\*) Chercheur, département des recherches, C.S.T.C.
 (\*\*\*\*) Premier assistant à la Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.
 (\*\*\*\*) Voir bibliographie n° 9 et 11.
 (\*\*\*\*\*) Voir bibliographie n° 7.
 (\*\*\*\*\*\*) Voir bibliographie n° 8.

-

frais imposé. C'est ce dernier point de vue qui a été retenu pour les essais. Le local étant ventilé continuellement, on contamine l'air initialement pur en injectant un gaz traceur à travers la bouche de soufflage. De cette façon, toute perturbation locale dans la circulation naturelle de l'air à l'intérieur du local est évitée.

Dans cette recherche, on s'est proposé de répondre en particulier aux questions suivantes:

- quelles sont les conditions de soufflage nécessaires pour éviter tout risque de gêne dans la zone d'occupation du local?
- existe-t-il une disposition de soufflage et de reprise plus efficace que les autres en ce qui concerne la décontamination de l'air du local? Peut-on établir une classification des différentes dispositions et conditions de soufflage?
- comment procéder pratiquement au contrôle des conditions de confort et à la mesure des taux de renouvellement d'air dans les logements?

# 3. SITUATIONS EXAMINÉES

#### 3.1 Conditions générales

Les essais ont été effectués dans une chambre climatique représentant un local d'habitation de 3,45 m  $\times$  4,80 m  $\times$  2,70 m et constituant un volume V = 44,7 m<sup>3</sup> (fig. 1).



Fig. 1 — Chambre climatique.

- 1. enveloppe isolante et caisson de compensation
- 2. maçonnerie
- 3. enveloppe isolante de l'ambiance extérieure
- 4. échangeur à plaques
- 5. veine d'air extérieur
- 6. vitrage

La chambre climatique comporte une seule paroi extérieure dénommée « façade » pour laquelle ont été simulés un vitrage double et une partie opaque bien isolée (\*).

Le chauffage est assuré par un radiateur à panneau simple disposé en allège. La température résultante au centre du local et la température extérieure sont fixées respectivement à  $t_R =$ 22 °C et  $t_e = -3$  °C.

L'effet du vent est obtenu par une circulation d'air tangentielle à la façade atteignant 3,5 m/s.

#### 3.2 Dispositions des orifices de soufflage et de reprise

On a considéré uniquement le cas de la reprise à la partie haute ou basse d'une porte placée dans la paroi opposée à la «façade». On a examiné 6 dispositions des orifices de soufflage et de reprise (fig. 2).



Fig. 2 — Dispositions des orifices de soufflage et de reprise.

La disposition 1 est celle de l'anémostat de plafond avec une reprise basse, de manière à éviter tout risque de court-circuit.

Les dispositions 2 et 3 sont en principe les plus économiques.

Les dispositions 4 et 5 correspondent à l'injection au dos du corps de chauffe et devraient par conséquent être les plus confortables en raison du mélange du jet de ventilation avec celui issu de la source de chaleur.

Enfin la disposition 6 représente le cas d'une ventilation contrôlée uniquement à la reprise avec aspiration de l'air frais en façade, mais elle n'a été envisagée qu'à titre indicatif.

#### 3.3 Conditions de soufflage

La ventilation est réalisée suivant trois débits; 25, 50 et 100 m<sup>3</sup>/h, soit pratiquement 1/2, 1 et 2 vol/h, avec une vitesse de 1,5 à 6 m/s afin de rester dans des limites acoustiques acceptables et une température allant de 10 à 22 °C, 10 °C correspondant au cas d'un récupérateur avec un rendement de 50 % (échangeur à plaques avec faible effet de contre-courant) et 22 °C étant la solution de « grand luxe » avec réchauffeur.

Toutes les combinaisons entre ces variables n'ont pu être retenues. On s'est limité à celles qui semblaient les plus intéressantes pour les résultats pratiques.

On a procédé tout d'abord à des essais de confort afin de n'examiner la qualité du balayage par gaz traceur que pour les situations où il n'y avait pas de risque de retombée du jet dans la zone d'occupation.

D'autre part, pour tous les essais, on disposait d'un bilan thermique de la chambre, réparti en  $\simeq 400$  W consommés par la façade, 150 W par les parois intérieures, 0 à  $\simeq 400$  W par la ventilation, soit au total 550 à 950 W.

<sup>(\*)</sup> Voir bibliographie nº 5, 9 et 11.

#### 4. MÉTHODE DE MESURE PAR GAZ TRACEUR (\*)

La méthode de mesure par gaz traceur a été développée en génie chimique dans le but de déterminer le temps de séjour moyen dans les réacteurs. Les principes de cette méthode peuvent être retenus pour déterminer expérimentalement le taux de renouvellement d'air dans un local d'habitation.

Le gaz traceur injecté ne doit pas perturber l'écoulement de façon notable. Il faut donc que ses propriétés physiques se rapprochent le plus possible de celles du fluide injecté. D'autre part, les conditions expérimentales nécessitent l'emploi d'une substance abondante, non toxique, peu coûteuse, et dont la concentration soit facilement mesurable. Pour ces diverses raisons, le gaz carbonique  $(CO_2)$  a été retenu pour les essais proposés.

La méthode est basée sur la technique du signal réponse consistant à introduire une concentration en gaz traceur a priori quelconque mais bien déterminée, et à mesurer l'évolution de cette concentration dans les divers points du local.

La réponse à une impulsion théorique (temps d'injection  $\tau_i \rightarrow 0$ ) dans le cas d'un mélange parfait est illustrée à la figure 3 et est donnée suivant la relation

#### $C = C_0 e^{-n\tau}$

avec n taux de renouvellement d'air

- C<sub>o</sub> concentration en fin d'injection
  - C concentration à l'instant τ compté à partir de la fin de l'injection



Fig. 3 — Mélange parfait. La probabilité de trouver le traceur injecté est au temps  $\tau$  constante dans tout le volume.

$$n = V/V C_o = V_i/V C/C_o = e^{-n\tau}$$

Pour les essais on s'est rapproché le plus possible de cette impulsion théorique.

La quantité de gaz traceur injectée V<sub>i</sub> est fixée de manière à obtenir une amplitude de réponse compatible avec la gamme de l'appareil de mesure. Dans l'analyseur utilisé, celle-ci correspond à une concentration de 1 % à fond d'échelle. On a choisi de réaliser un ressaut théorique d'environ 0,6 % correspondant à une quantité V<sub>i</sub> = 0,270 m<sup>3</sup>.

Pour un temps d'injection  $\tau_i = 2$  minutes avec un volume injecté de 0,270 m<sup>3</sup>, on reste environ 3% en dessous de la concentration théorique initiale C<sub>o</sub> (il y a déjà des pertes pendant l'injection). Cet écart (3 %) est du même ordre de grandeur que la précision de la mesure.

Le système d'injection utilisé permet de maintenir un débit total constant et égal au débit nominal.

# 5. MOYENS MIS EN OEUVRE

## 5.1 Chambre climatique

Le microclimat est déterminé suivant des distributions de températures d'air et de températures résultantes mesurées par une cinquantaine de sondes fixes réparties à l'intérieur de la zone d'occupation ainsi que par des relevés de températures et de vitesses d'air au moyen de deux sondes à thermistance montées sur un dispositif de translation télécommandé de l'extérieur et permettant une scrutation en n'importe quel point de l'ambiance (\*\*).

D'autre part au niveau des parois, les températures superficielles et les densités de flux sont mesurées en 80 points.

Un bilan thermique complet de l'installation peut donc être établi compte tenu des débits d'enthalpie de la source de chaleur et de la ventilation.

#### 5.2 Circuits aérauliques et circuit d'injection du gaz traceur CO<sub>2</sub> (fig. 4)



Fig. 4 — Circuit d'air et circuit d'injection du gaz traçeur  $CO_2$ .

 air vicié - 2. reprise basse - 3. reprise haute - 4. bouche en opposition - 5. anémostat de plafond - 6. bouche en façade - 7. bouche au sol - 8. régulation proportionnelle -9. batterie froide - 10. air neuf - 11. réchauffeur

(A) purge p pression ý débit t température

<sup>(\*)</sup> Voir bibliographie nº 2, 4 et 12.

<sup>(\*\*)</sup> Voir bibliographie nº 5, 9 et 11.

Quatre bouches de soufflage sont respectivement disposées au plafond, en opposition, au sol et en façade. Les deux positions de l'orifice de reprise sont simulées au moyen de deux bouches mobiles placées contre la paroi opposée à la façade : au sol (reprise basse) et à 2 m de hauteur (reprise haute).

Les circuits d'injection et de reprise sont conçus de manière à permettre l'équilibrage de la pression de la chambre climatique par rapport à celle du laboratoire (afin de réduire l'importance des fuites incontrôlées). Des prises de pression statique sont disposées dans la chambre climatique, dans la veine d'air à l'extérieur de la façade, dans le caisson de refroidissement et dans le caisson de conditionnement du plafond et de la paroi opposée à la façade.

La contamination en  $CO_2$  se fait par le circuit de ventilation. Pour réaliser une impulsion de forme rectangulaire, on purge tout le circuit par injection d'azote avant et après l'injection de  $CO_2$ .

#### 5.3 Equipement de mesure de la concentration en CO<sub>2</sub>

La concentration en  $CO_2$  est mesurée en neuf points à l'intérieur de la chambre (fig. 5) :

- un point à la reprise d'air (1)
- six points à 1,50 m de hauteur dont un au centre (5) et cinq à la périphérie de la zone d'occupation (2, 3, 4, 6 et 7)
- deux points sur la verticale centrale (8 et 9) à proximité respectivement du plafond et du sol.

La concentration de l'air ambiant du laboratoire est contrôlée à un dixième point.



Fig. 5 — Position des points de mesure de concentration en CO<sub>2</sub> dans la chambre climatique.
----- zone d'occupation

à la reprise d'air
3, 4, 5, 6, 7. à 1,50 m du sol
à 0, 10 m du plafond
à 0, 10 m du sol

L'appareil de mesure est un analyseur de gaz à absorption sélective dans l'infra-rouge (Onera type 80). Il est étalonné avant chaque essai (fig. 6).



Fig. 6 - Circuit des points de mesure de la concentration

- en CO<sub>2</sub> et de l'étalonnage. A. circuit des points de mesure
- B. étalonnage
- EV. électrovanne
- 1. pompe de vidange
- 2. sortie
- 3. mesure
- 4. rotamètre 5. filtre
- 6. pompe de mesure
- 7. N<sub>2</sub>
- 8. CO<sub>2</sub>
- 9. air <sup>\*</sup>
- p. pression

L'ensemble des équipements d'injection et de mesure du  $CO_2$  ainsi qu'une base de temps enclenchée au début de l'injection sont connectées à l'unité de mesure. Celle-ci commande l'ouverture successive des vannes du circuit de mesure pendant le temps nécessaire à l'analyse (30 s) (fig. 6).

Les cycles de mesure correspondent à l'analyse séquentielle des dix points et sont répétés toutes les 5 minutes durant l'essai.

L'adresse de chacun de ces points et le signal correspondant fourni par l'analyseur sont enregistrés sur bande perforée.

#### 5.4 Dépouillement des mesures sur ordinateur

Pour toutes les mesures concernant le microclimat intérieur et les échanges thermiques correspondants, on a réutilisé le programme de dépouillement mis au point à l'occasion de la recherche sur le confort thermique (\*). Ce programme a été complété pour tenir compte de la nature particulière des mesures de contamination.

# 6. RÉSULTATS DES ESSAIS

#### 6.1 Essais d'étanchéité de la chambre climatique

La circulation de l'air extérieur à proximité de la façade crée une dépression relativement importante; il en résulte une fuite qui est évaluée par des mesures aérauliques à 0,14 vol/h lorsque la chambre climatique est en équilibre

<sup>(\*)</sup> Voir bibliographie nº 9 et 11.

de pression avec le laboratoire. Les mesures avec gaz traceur CO<sub>2</sub> sans ventilation du local donnent le même ordre de grandeur (0,136 vol/h); ces dernières ont permis également de déceler une fuite de 0,043 vol/h en l'absence de circulation d'air extérieur.

#### 6.2 Essais sur le confort

On a défini une vitesse maximale de soufflage suivant le type de bouche et la section contractée.

L'allure du champ de vitesses dans le plan axial est représentée à la figure 7 pour les situations les plus typiques. Les variations de température d'air sont toujours négligeables dans la zone d'occupation; on ne les a donc pas reportées sur les graphiques.

Dans aucun des cas considérés, la ventilation n'affecte sensiblement le confort thermique global, pas plus que les échanges au niveau des parois. En effet, le champ des températures résultantes reste pratiquement inaltéré et la vitesse moyenne de l'air demeure toujours inférieure à 0,10 m/s dans la zone d'occupation.

Avec «l'anémostat» de plafond (fig. 7, a), le jet radial diffuse très rapidement et est fortement soutenu par effet Coanda (dépression entre le jet et la paroi attenante).

Dans le cas du soufflage à travers la bouche de faible allongement et disposée en partie haute de la paroi opposée à la «façade», il apparaît dans certaines situations (fig. 7, d et 7, e) une retombée du jet de ventilation à l'intérieur de la zone d'occupation avec des vitesses d'air localement excessives. Ainsi, on atteint une vitesse de 0,32 m/s à 1,80 m du sol sur la verticale centrale (fig. 7, e) accompagnée d'un effet de turbulence ( $\sigma/u \simeq 20$  %) (fig. 8). Cette retombée du jet est due à l'effet de la poussée d'Archimède et est donc liée à l'écart entre la température de soufflage et celle de l'ambiance intérieure. Au fur et à mesure que croît cet écart de température, il faut, pour un même débit, augmenter la vitesse de soufflage afin de donner au jet une « portée » suffisante au-dessus de la zone d'occupation. Ceci est illustré à la figure 9 (p. 22) où ont été tracées les isovitesses dans le



Fig. 8 - Exemple d'oscillation temporelle de la vitesse. En abscisse, au (s) En ordonnée, u (m/s)

 $V t_{s} u$ (m<sup>3</sup>/h) (°C) (m/s)



Fig. 7 - Représentation du champ de vitesses dans le plan axial pour les situations les plus typiques.

Conditions de soufflage :

- Ϋ́ débit (m<sup>3</sup>/h)
- ts température (°C)
- vitesse (m/s) u

-- délimitation de la zone d'occupation + vitesse u (cm/s) en grisé, u > 10 cm/s



Fig. 9 — Exemples d'isovitesses dans le jet de ventilation. Conditions de soufflage :

- ý débit (m³/h) t<sub>s</sub> température (°C)
- u vitesse (m/s)

jet de ventilation. On constate d'autre part que le jet de convection naturelle issu de la source de chaleur a lui-même une plus grande portée lorsqu'il y a retombée du jet de ventilation.

Dans le cas de l'injection au sol derrière le corps de chauffe (fig. 7, f), le jet de ventilation se mélange au jet de convection naturelle issu de la source et il n'y a pratiquement aucun risque de retombée.

Avec l'injection en façade (fig. 7, g et 7, h) ,on bénéficie encore d'un fort effet Coanda en raison de l'allongement de la bouche de soufflage et encore d'un mélange partiel du jet de ventilation avec celui provenant du corps de chauffe. Ceci explique sans doute que dans cette situation (fig. 7, h), le jet froid ne pénètre pas très profondément à l'intérieur de la zone d'occupation.

#### 6.3 Essais au gaz traceur

Une cinquantaine d'essais de contamination au  $CO_2$  couvrent les différentes modalités d'injection et de reprise envisagées antérieurement (§ 3.2 et 3.3, p. 18) à l'exclusion de celles qui ont été jugées inconfortables.

A titre indicatif, une dizaine de ces essais ont été réalisés en conditions strictement isothermes, alors que tous les autres correspondaient aux mêmes conditions nominales (températures respectivement de 22 et -3 °C à l'intérieur et à l'extérieur du local).

Sur base des premiers résultats obtenus, il a été décidé de procéder au brassage de l'air par des petits ventilateurs uniquement pendant l'injection du gaz traceur. Cette procédure fait évidemment perdre l'information propre à la réponse impulsionnelle au bénéfice d'une contamination initiale mieux définie dans tout le local.

Enfin pour certains essais qui servent de références, on a effectué un brassage continu durant toute la période de mesure, de manière à se rapprocher le plus possible des conditions de « mélange parfait ».

Sauf pour quelques essais isothermes, les écarts entre le taux de renouvellement d'air « fictif » résultant de l'analyse au gaz traceur n' et le taux de renouvellement d'air réel n sont toujours relativement faibles et pratiquement peu significatifs. La dispersion moyenne est à peine de l'ordre de  $\pm$  10 % pour l'ensemble des essais réalisés aux conditions nominales.

A l'exception encore de quelques essais isothermes très particuliers, le coefficient de corrélation relatif à la décontamination au point central est supérieur à 0,99 dans tous les cas.

Enfin, l'hétérogénéité spatiale du contaminant est toujours aussi relativement faible (au plus de l'ordre de  $\pm$  10%). C'est uniquement au voisinage du plafond que l'on peut discerner un écart systématique de l'ordre de — 10% en moyenne pour l'ensemble des situations examinées sans brassage continu et en conditions anisothermes.

Deux exemples de décontamination en conditions anisothermes sont donnés à la figure 10.

Les diagrammes sont présentés en coordonnées semi-logarithmiques réduites :





Fig. 10 — Essais en conditions nominales. Bouche de soufflage en opposition avec reprise basse.  $\dot{V} = 54 \text{ m}^3/h$  u = 8,1 m/s.

- A gauche, brassage pendant l'injection
  - ------  $e^{-n\tau}$  (décontamination théorique)
  - ----- e<sup>-1,12</sup> nT (régression expérimentale)
  - r = 0,998 (coefficient de corrélation)
- A droite, brassage continu
  - ——— e<sup>-n</sup>τ (décontamination théorique)
  - r = 0,9995 (coefficient de corrélation)
- + sur la verticale centrale à 1,50 m au-dessus du sol
- $\Delta\,$  sur la verticale centrale à 0,10 m du plafond
- abla sur la verticale centrale à 0,10 m du sol

- en ordonnée, la contamination relative

 $\frac{C-C_{a}}{C_{o}-C_{a}}$  (échelle logarithmique)

avec Co contamination initiale

et donc

$$0 \leqslant \frac{C - C_{\rm a}}{C_{\rm o} - C_{\rm a}} \leqslant 1$$

- en abscisse, le temps réduit nτ (échelle linéaire)

avec n taux de renouvellement d'air réel

 $n\tau$  se compte donc en constantes de temps de la chambre climatique (le temps  $\tau$  est mesuré à partir de la fin de l'injection du gaz traceur).

Dans cette représentation, la loi de décontamination apparaît comme une droite passant par  $\frac{C-C_a}{C} = 1$  pour  $n\tau = 0$  et de pente — n,  $\overline{C_o - C_a}$ 

si le mélange peut être considéré comme parfait.

On a représenté en trait continu la droite de décontamination théorique qui correspondrait au mélange parfait et en traits interrompus la droite de régression correspondant au point central (à 1,50 m du sol).

Pour l'ensemble des essais anisothermes qui ont été réalisés, on peut dire que la décontamination suit toujours de très près celle correspondant au brassage parfait de l'air dans le local.

#### 7. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

#### 7.1 Confort thermique

Il ne semble pas y avoir de risque d'inconfort avec l'injection d'air au moyen de l'anémostat de plafond ou par une bouche disposée au sol derrière le corps de chauffe. Les vitesses d'air dans la zone d'occupation du local restent partout négligeables ( $\leq 0,1$  m/s).

Par contre, l'introduction d'air par une bouche dans le haut de la paroi opposée à la façade peut entraîner une retombée du jet dans la zone d'occupation sous l'effet de la poussée d'Archimède. Or cette disposition est particulièrement intéressante, car elle permet une distribution beaucoup plus économique de l'air dans les différents locaux.

Dans ce dernier cas, on peut esquisser la ligne axiale du jet d'air par une parabole du type

$$\frac{z}{\sqrt{A}} = K A_r \left(\frac{x}{\sqrt{A}}\right)^* (*$$

avec z déflection verticale du jet (fig. 11)

- x distance par rapport à la bouche de soufflage
- A section nette de la bouche de soufflage
- K constante expérimentale

Ar nombre d'Archimède défini au niveau de la bouche de soufflage

$$A_{\rm r} = \frac{g \ \beta \ \Delta \ t \ \sqrt{A}}{u^2}$$

où g accélération de la pesanteur

- ß coefficient d'expansion thermique du  $gaz \simeq 1/T$ K -1
- $\Delta t$  écart entre la température de soufflage et celle de l'ambiance
- vitesse de soufflage, supposée uniforн me(m/s)



Fig. 11 - Déviation du jet de ventilation sous l'effet de la poussée d'Archimède.

z. déflection verticale du jet;  $z_{max} = 2,45$  m

distance par rapport à la bouche de soufflage; xmax = х. 4,80 m

Pour une bouche de faible allongement, relativement écartée du plafond et dont la section nette diffère peu de la section brute, on a selon Jackman (\*\*)

$$K \simeq 0.04$$

On peut d'autre part calculer la section nette de la bouche de soufflage A en fonction du débit  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/h) et de la vitesse de soufflage u (m/s).

$$A = \frac{\dot{V}}{3.600 \text{ u}}$$

Enfin, avec une longueur de la zone d'occupation de x  $\simeq$  4 m, on obtient

$$z \simeq 5,16 \frac{\Delta t}{\mu^{3/2} \dot{V}^{1/2}}$$
 (m)

Ainsi, par exemple, dans le cas de la situation donnée à la figure 7, e, on obtient z = 1,75 m, c'est-à-dire que le jet est pratiquement retombé jusqu'au sol avant d'atteindre la façade. Cette estimation est en très bon accord avec les résultats des mesures. Pour la situation donnée à la figure 7, c, on a z = 0,80 m, ce qui signifie que le jet effleurerait à peine le haut de la zone d'occupation comme le confirment effectivement les résultats expérimentaux.

Pour éviter tout risque d'inconfort, on peut imposer la condition z  $\leq$  0,50 m pour x  $\simeq$  4 m, ce qui correspond ici à

$$u \ge 4,7 \frac{\Delta t^{2/3}}{\dot{V}^{1/3}}$$

En appliquant ce critère, on obtient les vitesses minimales données dans le tableau 1 pour les différents écarts de température et débits envisagés dans le cadre de cette recherche.

On peut aussi dans une certaine mesure réduire la déflection verticale du jet en utilisant une bouche plus allongée et disposée très près du

<sup>(\*)</sup> Voir bibliographie nº 1, 3, 6 et 13. (\*\*) Voir bibliographie nº 6.

Tableau 1 — Vitesses de soufflage minimales en fonction de l'écart de température et du débit pour la bouche disposée «en opposition» par rapport à la façade

Δt (K) ỷ (m³/h)	3,5	7	12,5	25
25	3,7	5,9	8,7	13,8
50	3,0	4,7	6,9	11,0
100	2,3	3,7	5,5	8,7

plafond. Il se crée alors une dépression favorable au-dessus du jet (effet Coanda) qui est notamment bien confirmée par les résultats expérimentaux de Jackman (\*).

#### 7.2 Interprétation des mesures effectuées au moyen du gaz traceur

#### 7.21 Limitation de la technique par gaz traceur

La précision de l'appareillage utilisé et ses limitations introduisent une erreur sur l'évaluation du taux de renouvellement d'air.

Les principales sources d'imprécision sont les suivantes :

 erreur de mesure de l'analyseur au CO<sub>2</sub> (défaut de linéarité) :

 $|\Delta C| \simeq 0.01 \%$ 

 temps de réponse de l'analyseur; avec la période de mesure fixée à 30 s, il subsiste une erreur :

$$\frac{\Delta C}{C} \simeq 0,0045$$

 erreur de zéro (dérivée de la concentration résiduelle en CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant):
 | ΔC | ≃ 0,015 %

On peut montrer que la précision finale sur le taux de renouvellement d'air n est la meilleure en prolongeant les mesures sur une période de l'ordre de deux fois la constante de temps du local.

L'erreur maximale possible serait alors :

$$\frac{\Delta n}{n} \simeq 7,5\%$$

# 7.22 Ecarts par rapport au mélange parfait

La situation la plus proche du mélange parfait est celle où l'on brasse artificiellement l'air au moyen de petits ventilateurs pendant toute la durée de l'essai (fig. 10, p. 23).

Nous avons déjà signalé que pratiquement toutes les situations examinées, en conditions anisothermes, se rapprochent très fort du mélange parfait.

En ce qui concerne la convection forcée, on peut montrer par la théorie des jets que le taux

de brassage intérieur  $n_b$  augmente en fonction du débit de quantité de mouvement de la source l selon une loi du type :

avec I = 
$$\rho \left( \frac{\dot{V}}{3.600} \text{ u} \right)$$
 [N]

où ρ masse volumique (≃ 1,2 kg/m³) V débit de soufflage (m³/h) u vitesse de soufflage (m/s)

Les quelques essais effectués en conditions strictement isothermes montrent que ce brassage est déjà pratiquement parfait dès que le débit de quantité de mouvement dépasse  $\simeq$  0,1 N.

Avec les débits d'air envisagés ici, ce seuil est atteint pour les vitesses données dans le tableau 2.

Tableau 2

ໍ່ (m³/h)	25	50	100			
u (m/s) (*)	12	6	3			
(*) Il s'agit toujours de vitesses maximales dans la section contractée.						

Mais l'action de la convection naturelle est encore plus importante. On peut d'ailleurs évaluer le brassage qui y correspond en assimilant par exemple le radiateur en allège d'à une demi-source linéique (\*\*).

On obtient

$$n_b \simeq 0.7 \ \dot{Q}_c^{1/3}$$

avec n<sub>b</sub> (vol/h) Q<sub>c</sub> émission convective du radiateur (W)

Dans le cas étudié  $\dot{Q}_c$  représente  $\simeq 65\%$  de l'émission totale  $\dot{Q}$  du radiateur, compte tenu de la fraction du flux radiatif au dos qui est restituée sous forme convective par l'allège ( $\simeq 15\%$  de  $\dot{Q}$ ).

Pour une émission moyenne de l'ordre de 500 W dans les situations examinées ici, on trouve ainsi un taux de brassage relativement élevé :

$$n_b \simeq 4 \text{ vol/h}$$

Dans la pratique, le brassage intérieur dû à la convection naturelle est toujours très important. En plus de la source de chauffage, on devrait tenir compte de la présence des occupants eux-mêmes ( $\dot{Q}_c \simeq 40$  W/personne), de l'éclairage ou de l'insolation éventuelle à travers les fenêtres, etc.

#### 8. CONCLUSIONS

Les résultats permettent d'apporter les réponses suivantes aux trois questions initialement posées (§ 2, p. 18) :

<sup>(\*)</sup> Voir bibliographie nº 6.

<sup>(\*\*)</sup> Voir bibliographie nº 10.

 parmi les dispositions envisagées, seul le soufflage horizontal à travers une bouche disposée «en opposition» par rapport à la façade peut provoquer un certain inconfort.

Cet inconfort est dû à une retombée du jet dans la zone d'occupation du local sous l'effet de la poussée d'Archimède. Pour s'en prémunir, il faut satisfaire à une condition minimale sur la vitesse de soufflage, en fonction du débit et de la température de l'air insufflé.

Les résultats obtenus dans cette recherche ne sont probablement pas transposables directement à d'autres géométries du local et à d'autres caractéristiques des bouches. L'expérimentation reste souhaitable pour des applications spécifiques (comme en conditionnement d'air par exemple)

— il n'y a pas de différence significative entre les dispositions envisagées pour ce qui concerne la « qualité du balayage », c'est-à-dire la possibilité de « purger » plus efficacement la zone d'occupation avec un même débit d'air. On se retrouve pratiquement toujours en conditions de « mélange parfait ». Ceci est dû au fort brassage de l'air intérieur, non seulement par le jet de ventilation, mais aussi par la convection naturelle toujours présente en conditions anisothermes.

C'est seulement dans le cas très hypothétique d'une rigoureuse isothermie intérieure que l'on discernerait des différences d'efficacité selon les positions des orifices de soufflage et de reprise. Et encore ces différences ne seraient-elles vraiment significatives que pour de faibles valeurs du débit et de la vitesse de pulsion. Or, on sait que, du point de vue du confort, on n'a certainement pas intérêt à réduire exagérément cette vitesse

pour déceler les risques éventuels d'inconfort, on doit procéder à des mesures systématiques de vitesses d'air (l'effet de la température est généralement négligeable). Ces mesures doivent être intégrées sur des intervalles d'au moins 1 ou 2 minutes compte tenu de l'importance des oscillations autour de la valeur moyenne. L'influence des oscillations de vitesse sur le risque de gêne est encore mal connue, mais elle ne peut sans doute pas être négligée.

Le taux de renouvellement d'air peut être mesuré avec une bonne précision par la méthode du gaz traceur. La méthode la plus sûre consiste à réaliser une contamination uniforme en brassant l'air par des ventilateurs d'appoint dès avant l'injection et pendant tout l'essai; la mesure peut alors s'effectuer en un seul point. La confrontation entre la quantité de gaz traceur injectée et la concentration initiale obtenue permet de vérifier l'hypothèse de mélange parfait.

L'essai sur un seul local ne peut fournir qu'une information fragmentaire sur la qualité de la ventilation. L'interprétation vraiment satisfaisante du phénomène exigerait un bilan complet de l'habitation, ceci grâce à une analyse au gaz traceur effectuée simultanément dans tous les locaux.

# Bibliographie

- Baturin, V.V. Fundamentals of industrial ventilation. Oxford, Pergamon Press, 1972.
- Chen, M.S.K., Fan, L.T., Hwang, C.L. et Lee, E.S. Air flow models in a confined space. A study in age distribution. Oxford, Building Science, vol. 4, 1969.
- 3. Croome-Gale, D.J. et Roberts, B.M. Air conditioning and ventilation of building. Oxford. Pergamon Press, 1975.
- Danckwerts, P.V. Continuous flow systems. Londres, Chemical Engineering Science, vol. 2, 1953.
- Hannay, J., Laret, L., Lebrun, J., Marret, D., Nusgens, P. et Wannyn, J.-P.
   Confort thermique et consommation d'énergie dans les conditions d'hiver. Bruxelles, C.S.T.C.-revue, n° 2,
- juin 1976. 6. Jackman, P.J. Air movement in rooms with side-wall mounted grille design procedure. Bracknell, HVRA Laboratory, Report n° 65, 1970.
- Laret, L., Lebrun, J., Marret, D. et Nusgens, P. Circuits aérauliques. Efficacité de la ventilation mécanique contrôlée. Bruxelles, Rapport de recherche de l'IC-IB, octobre 1976.
- 8. Laret, L., Lebrun, J., Marret, D. et Nusgens, P.

Etude expérimentale sur l'efficacité de la ventilation mécanique contrôlée dans un local d'habitation. Liège, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, n° 62, 1976.

9. Laret, L., Lebrun, J., Marret, D., Nusgens, P. et Wannyn, J.-P.

Confort thermique et consommation d'énergie dans des conditions d'hiver. Liège, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, n° 56, 1975.

10. Lebrun, J. et Marret, D.

Convection exchanges inside a dwelling room in winter. The 1976 Seminar of the International Centre for Heat- and Mass-Transfer « Turbulent buoyant convection » (Dubrovnik). Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1976.

- Lebrun, J. et Marret, D. Confort thermique. 1" partie. Etude du confort thermique et de la consommation d'énergie dans les conditions d'hiver. Bruxelles, Rapport de recherche IC-IB, mai 1975.
- Levenspiel, O. et Bischoff, K.B. Patterns of flow in chemical process vessel 3. Advances in Chemical Engineering. Vol. 4. New York, Academic Press, 1963.
- Recknagel, H. et Sprenger, E. Taschenbuch f
  ür Heizung, L
  üftung und Klimatechnik. Munich, R. Oldenbourg, 1970.