

Applications de méthodes à gaz traceurs aux mesures aérauliques dans les bâtiments et les systèmes de ventilation.

*Raphaël Compagnon, Martin Jakob, Claude-Alain Roulet
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
Département d'Architecture
Ecole Polytechnique Fédérale, 1015 Lausanne*

Abstract

There are various ways to measure the air flow patterns and their consequences in buildings. The appropriate measurement method should be chosen according the problem to solve, hence to the physical quantity to be determined.

This paper presents three practical examples of the use of tracer gases in buildings, allowing to obtain: a) the air flow rates between various rooms and between these rooms and the outside; b) the air flow rate in inlet and exhaust ducts and the detection of shortcuts between them and c) the map of the age of air or of the concentration of a contaminant in a room.

As well the obtained results as the acquired practice show that these measurement methods are now operational.

Résumé

Les mouvements d'air dans les bâtiments peuvent être mesurés de diverses manières. Suivant le problème à résoudre, et donc la grandeur à déterminer, on choisira la méthode de mesure adéquate.

Cette communication présente trois applications pratiques de méthodes utilisant des gaz traceurs dans les bâtiments, permettant de déterminer: a) des débits d'air entre diverses chambres et entre ces chambres et l'extérieur, b) le débit d'air dans des conduites de ventilation et la détection de court-circuits et c) la carte de l'âge de l'air ou de la concentration en polluants dans un local donné.

Les résultats obtenus dans des cas réels ainsi que les expériences faites montrent que ces méthodes de mesure sont maintenant opérationnelles.

Zusammenfassung

Es gibt verschiedene Messmethoden zur Erfassung von Luftströmungen und ihren Auswirkungen in Gebäuden. Die angewendeten Messmethoden müssen dabei sowohl entsprechend dem zu lösenden Problem als auch in Abhängigkeit von den zu erfassenden physikalischen Grössen ausgewählt werden.

Der Bericht stellt drei praktische Beispiele für die Anwendung von Spurgasen in Bauwerken vor. Folgende Probleme können damit untersucht werden: a) der Luftstrom zwischen verschiedenen Räumen sowie zwischen diesen Räumen und der Aussenwelt; b) der Luftstrom in Zu- und Abluftleitungen sowie die Feststellung von Kurzschlüssen zwischen diesen; c) die Verteilung von Luft unterschiedlicher Verweildauer bzw. einer Luftverschmutzung bestimmter Konzentration im Raum.

Sowohl die erhaltenen Resultate als auch die praktischen Erfahrungen zeigen, dass die jeweils angewendeten Methoden sehr zweckdienlich sind.

1. Position du problème

Diverses méthodes de mesurage, utilisant des gaz traceurs, peuvent être utilisées pour déterminer l'importance des débits d'air dans un bâtiment, les caractéristiques d'un système de ventilation ou la répartition des polluants dans un ou plusieurs locaux. La planification des mesures à effectuer et le choix d'une méthode de mesurage adéquate dépendent en premier lieu du problème à résoudre, problème qu'il convient de définir précisément (table 1).

Problèmes à résoudre	Mesures à envisager
Caractériser le système de ventilation (qu'il soit naturel ou mécanique):	Mesurer les débits d'air dans le bâtiment et le taux de renouvellement d'air dans divers locaux; Déterminer les débits dans des conduites d'air; Déterminer l'efficacité de l'installation de ventilation, à savoir la part du débit d'air assuré par l'installation par rapport à la part d'infiltration.
Quantification de la qualité de l'air dans un local	Déterminer l'âge de l'air à différents endroits dans le local. Elaborer une carte tridimensionnelle de la concentration en polluants, étant donné une (ou plusieurs) source de polluants et un état de fonctionnement donné du système de ventilation.
Caractérisation de l'ensemble salle-système de ventilation	Déterminer l'efficacité de renouvellement d'air, notamment aux endroits habités de ce local Déterminer l'efficacité de la ventilation, c'est à dire l'efficacité d'extraction des polluants générés dans le local.

Table 1: Problèmes à résoudre et mesures possibles dans le domaine des mouvements d'air dans les bâtiments.

Les diverses méthodes de mesurage possibles sont répertoriées et décrites dans les références [1] à [6], ainsi que dans d'autres publications†. A partir de deux applications réelles, l'une sur un bâtiment entier et l'autre sur un grand local équipé d'une installation de ventilation à double flux, cette communication entend montrer le caractère opérationnel de ces méthodes de mesurage. En outre, une méthode originale de la cartographie de l'âge de l'air dans un local est présentée et illustrée à l'aide de mesures sur une chambre expérimentale.

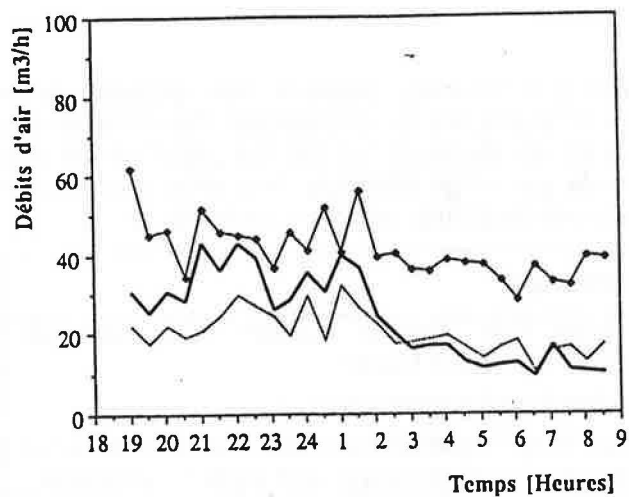
2. Mesures de débits d'air interzones

Dans une précédente communication [7], le système de mesure multigaz à concentration constante CESAR3 a été présenté. L'équipement ainsi que le logiciel d'interprétation des mesures sont actuellement fonctionnels. Rappelons que ce système est destiné à mesurer les débits d'air entre les différentes zones d'un bâtiment et entre ces zones et l'extérieur.

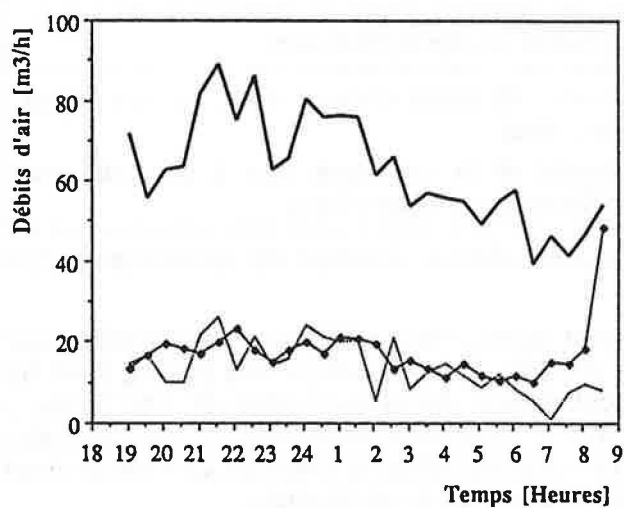
La principale originalité de système CESAR3 réside dans la méthode d'interprétation des mesures dite "zone par zone", qui est décrite dans [8]. Par rapport à la méthode globale usuellement employée [3 à 5], la méthode "zone par zone" présente le grand avantage de permettre la détermination de plusieurs débits d'air entre plusieurs zones sans pour autant devoir disposer d'autant de gaz traceurs différents que de zones.

La figure 1 illustre l'évolution des débits d'air pénétrant dans trois pièces superposées du bâtiment LESO ([7] et [9]) au cours d'une expérience nocturne (sans occupants). L'effet de cheminée apparaît clairement sur cette figure, puisque l'on remarque que le local du rez est entièrement ventilé par de l'air extérieur alors que le local du haut du bâtiment est principalement ventilé par de l'air provenant de la cage d'escalier.

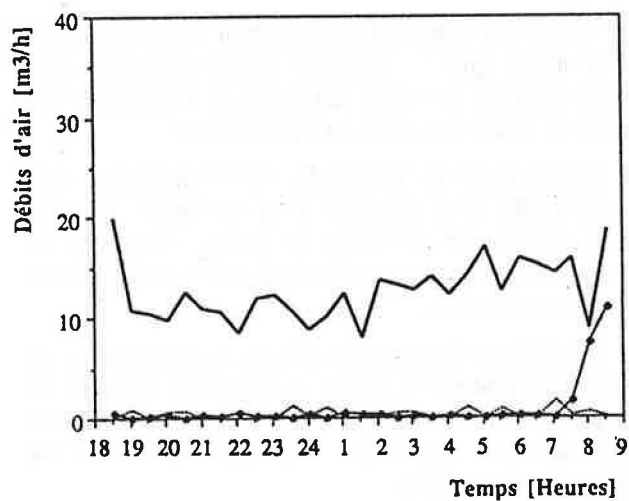
† Un nouvel ouvrage présentant toutes ces méthodes de mesures dans ses derniers développements est en préparation dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie, en collaboration avec l'Air Infiltration and Ventilation Centre et sous la responsabilité d'un des auteurs.



2ème étage



1er étage



Rez de chaussée

— Air provenant de l'extérieur
 —◆— Air provenant de la cage d'escalier
 Air provenant d'une pièce voisine

Figure 1: Débits d'air entrant dans 3 pièces superposées du LESO et déterminés à l'aide de 3 gaz traceurs.

3. Débits d'air dans une installation de ventilation

3.1 Débit dans une conduite

La méthode classique pour mesurer les débits d'air dans les conduites consiste à installer un débitmètre ou à mesurer les profils de vitesse au travers de la conduite et de les intégrer sur la section complète. La première méthode nécessite l'installation d'un appareillage encombrant et modifie fortement les pertes de charge dans la conduite. La deuxième est fastidieuse et toutes deux ne sont possibles que si la conduite est rectiligne sur plus de 10 diamètres de longueur.

Si on injecte un débit connu (ou une quantité connue) de traceur à un endroit de la conduite et que l'on mesure la concentration en aval à un endroit où on est sûr que le gaz traceur est bien mélangé à l'air, on peut directement déduire le débit d'air dans la conduite.

Soient C la concentration massique en gaz traceur mesurée, Q [kg/s] le débit massique dans la conduite et q [kg/s] le débit massique d'injection du traceur. En régime permanent, ces grandeurs sont reliées par:

$$Q = \frac{q}{(C - C_0)} \quad (1)$$

où C_0 est la concentration éventuelle du traceur en amont de l'injection.

Si le traceur est injecté en une seule impulsion de masse m , la concentration mesurée dépend du temps et le débit est donné par:

$$Q = \frac{m}{\int [C(t) - C_0(t)] dt} \quad (2)$$

où l'intégrale porte sur tout le temps pendant lequel $C(t) > C_0(t)$.

Cette dernière méthode a été utilisée avec succès pour mesurer le débit d'extraction de l'installation de ventilation des bâtiments de la CIPEF à Préverenges [10], où toute autre méthode s'est avérée inutilisable. On a ainsi pu prouver que les débits effectifs étaient légèrement inférieurs aux débits prévus et, en combinant ces mesures avec des mesures de renouvellement d'air, on a vu que l'essentiel du renouvellement d'air est dû à l'extraction.

3.2 Débits d'air dans une installation à double flux

Dans une telle installation, comportant notamment un échangeur de chaleur à roue, la situation est plus complexe, car il peut se produire des court-circuits (fig. 2).

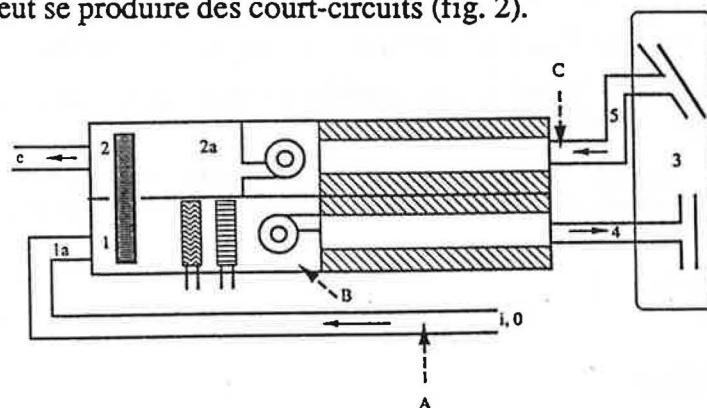


Figure 2: Représentation schématique de l'installation de ventilation de l'auditoire D16.2 de l'ETHZ, comportant un récupérateur de chaleur à roue. A, B et C représentent les endroits d'injection possibles pour des gaz traceurs et les chiffres représentent des endroits de mesure de la concentration.

Un tel système peut être modélisée par un réseau nodal où chaque branche représente une conduite ou un passage possible pour l'air et chaque noeud représente une connexion entre ces passages.

En écrivant la conservation des masses de traceurs injectés aussi bien que de l'air circulant au travers du système de ventilation, on obtient un nombre important d'équations qui peuvent être résolues pour trouver les débits cherchés. Les mesures effectuées dans l'auditoire D16.2 de l'ETHZ ont finalement donné les résultats résumés dans la figure 3. Il s'avère que les débits effectifs sont légèrement plus faibles que ceux prévus par le bureau technique et qu'un débit d'air relativement important passe directement au travers de l'échangeur de chaleur. Ce phénomène est essentiellement dû au manque d'équilibrage des pressions de part et d'autre de l'échangeur à roue.

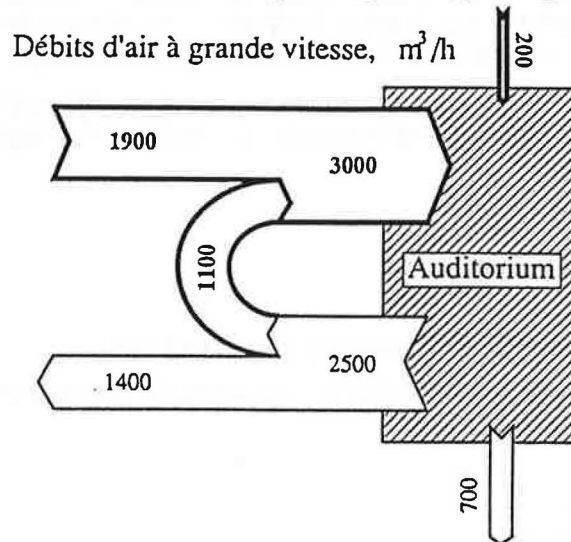


Figure 3: Débits d'air mesurés dans l'auditoire D16.2 de l'ETHZ. (A cause d'un problème d'étalonnage, les valeurs des flux donnés en caractères maigres sont entachés d'une incertitude plus grande que les autres, écrits en gras.)

4. Cartographie de l'âge de l'air dans une pièce

L'air d'une pièce étant constamment renouvelé, on peut donner à chaque volume élémentaire d'air contenu dans la pièce un âge, qui est le temps passé depuis que ce volume élémentaire, initialement supposé frais, est entré dans la pièce. Du fait que tout système de ventilation réel dans une pièce a des zones bien ventilées et des zones relativement stagnantes, l'âge de ces volumes élémentaires varie selon leur position.

On peut mesurer l'âge moyen de l'air à un endroit donné en procédant comme suit:

- 1) Injecter uniformément dans la pièce une quantité de gaz traceur suffisante pour que la concentration de ce gaz soit aisément mesurable.
- 2) Mesurer la concentration en traceur $C(t)$ à l'endroit intéressant dès l'arrêt de l'injection, jusqu'à ce que cette concentration, qui va décroissant depuis la concentration initiale $C(0)$, soit pratiquement nulle.

L'âge de l'air s'obtient alors par‡:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} C(t) dt}{C(0)} \quad (3)$$

‡ D'autres méthodes existent, et se trouvent dans les références [6 et 11].

Pour quantifier la qualité de l'air dans la partie habitée d'un local, il peut être intéressant de déterminer une carte de l'âge de l'air, ainsi que de donner une valeur moyenne pour le local.

A l'heure actuelle, il n'est pas possible de multiplier à l'infini les points de mesure de la concentration de traceur dans une chambre. D'autre part, les effets de la diffusion et les turbulence ont tendance à homogénéiser cette concentration, qui ne peut donc pas varier très fortement d'un point à l'autre. Pour avoir une carte utilisable, le nombre restreint de points de mesure disponibles suffit, mais ils doivent être disposés judicieusement. Le nombre minimum de points de mesure dépend du détail demandé pour la carte de l'âge de l'air.

La position dans l'espace étant représentée par trois coordonnées x_i ($i = 1, 2, 3$), on peut représenter un champ scalaire v quelconque par un modèle empirique de type quadratique:

$$v = a + \sum_i b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2 \quad (4)$$

ou encore par tout autre modèle plus complexe. Dans le premier cas, 10 points de mesure suffisent pour déterminer les 10 coefficients. Etant donné que l'appareil CESAR3 peut mesurer 10 points, il est nécessaire de les placer au mieux, de manière à obtenir les coefficients de ce modèle avec un minimum d'incertitude [12] à [14].

Les coefficients du modèle se déterminent à partir du système d'équations:

$$\underline{V} = \underline{M} \underline{A} \quad (5)$$

où:

$\underline{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ est le vecteur contenant les valeurs de la variable mesurée (dans notre cas l'âge de l'air) aux n endroits de mesure.

$\underline{M}$ est une matrice dont chaque ligne correspond à un point de mesure. La première colonne contient des 1, les trois suivantes contiennent les coordonnées du point, les 3 suivantes les produits (soit $x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3$) et les 3 dernières les carrés des coordonnées.

$\underline{A}$ est un vecteur contenant les coefficients a, b_i, b_{ij} ($i \neq j$) et b_{ii} du modèle empirique.

Les résultats de mesures contenus dans $\underline{M}$ et $\underline{V}$ sont entachés d'erreurs qui conduisent à une incertitude sur les coefficients contenus dans $\underline{A}$. Le nombre appelé "condition" de la matrice $\underline{M}$:

$$\text{cond } \underline{M} = \|\underline{M}\| \cdot \|\underline{M}\|^{-1} \quad (6)$$

où $\|\underline{M}\|$ est une norme de $\underline{M}$ est en relation directe avec l'erreur sur le résultat: cette erreur sera d'autant plus faible que la condition de $\underline{M}$ sera plus petite [14]. Du fait que ce nombre ne dépend que des coordonnées des points de mesure et du modèle adopté, il peut être calculé avant de faire l'expérience et il est un bon critère de choix pour un ensemble de points.

Huit plans d'expérience différents ont été examinés dans le but de cartographier une pièce parallélépipédique avec 10 points de mesure. Plusieurs d'entre eux se sont avérés inutilisables du fait qu'ils entraînent une trop mauvaise condition de $\underline{M}$. Deux plans parmi les plus favorables sont représentés dans la figure 4.

Ces plans ont été appliqués à la cartographie de l'âge de l'air d'un local bien contrôlé (CHEOPS pour CHambre Expérimentale d'Observation de Phénomènes de Stratification) qui est étanche à part deux ouvertures calibrées et bien isolé thermiquement pour éviter les effets non voulus de gradients thermiques (figure 5). Ces expériences ont été réalisées en introduisant dans la chambre un débit d'air frais constant correspondant à un taux de renouvellement d'air global de $0,5 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ (ou une constante de temps nominale de 2 h).

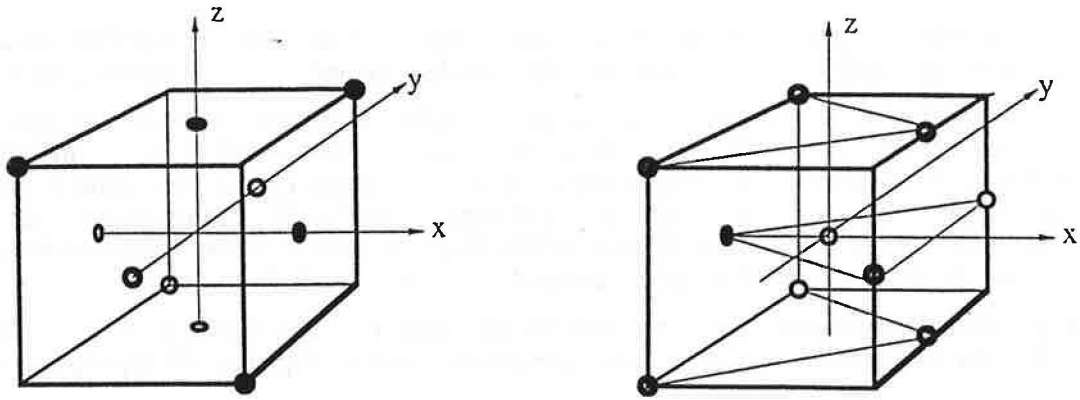


Figure 4: Plans d'expérience C3 à gauche, (cond $\underline{M} = 4.33$) et 3Δ à droite, (cond $\underline{M} = 8.88$)

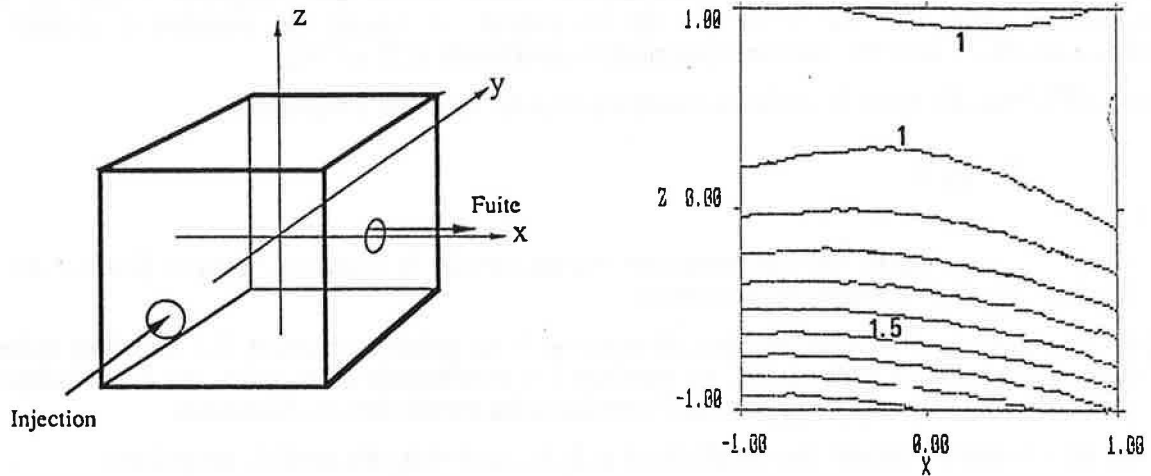


Figure 5: A gauche, repère de coordonnées, entrée et sortie d'air dans la chambre pour la cartographie de l'âge de l'air. A droite, courbes d'âge de l'air constant dans le plan $y = 0$ obtenues à l'aide du modèle ajusté sur des mesures obtenues avec le plan C3.

On remarque que l'air neuf, légèrement plus chaud que l'air de la pièce, tend à monter au plafond pour redescendre ensuite vers la sortie. Dans ce cas, l'air du bas de la pièce est relativement stagnant.

Une fois les coefficients du modèle empirique déterminés, on peut d'une part tracer une carte montrant les courbes d'âge de l'air constant (figure 5) et d'autre part calculer l'âge moyen de l'air dans la pièce par:

$$\langle \tau \rangle = a + \frac{2}{3} \sum_i b_{ii} \quad (7)$$

Dans notre chambre, nous avons ainsi déterminé $\langle \tau \rangle = 1,197$ h, ce qui correspond à 1% près à l'âge moyen déduit à l'aide d'une autre méthode [11] utilisant la concentration mesurée dans l'ouverture de sortie d'air (supposée unique) [11]. Cette méthode donne $\langle \tau \rangle = 1,209$ h.

Enfin, l'efficacité de renouvellement d'air, définie par le rapport de l'âge moyen dans la pièce à son temps caractéristique (qui est lui-même l'inverse du taux de renouvellement d'air) vaut ici:

$$\varepsilon = \frac{\langle \tau \rangle}{\tau_c} = \frac{1,2}{2} = 0,6 \quad (8)$$

Ce chiffre donne l'efficacité avec laquelle l'air est renouvelé dans la pièce. Si le brassage est complet, $\varepsilon = 0,5$, alors que $\varepsilon = 1$ dans le cas d'une ventilation en piston.

5. Conclusions

Il est maintenant possible de mesurer de nombreuses grandeurs physiques en relation avec les mouvements d'air dans une pièce ou entre diverses zones. On peut notamment contrôler relativement aisément l'efficacité des systèmes de ventilation installés.

Compte tenu du fait que d'une part, le nombre de bâtiments et d'installations mesurés effectués à ce jour est faible (et donc que des indications statistiques manquent) et que d'autre part des défauts de fonctionnement ont été observés dans toutes les installations mesurées jusqu'ici, nous proposons vivement de multiplier ce genre de mesures, dans le but de mieux connaître et d'améliorer l'efficacité des installations de ventilation.

Remerciements

Le développement de l'appareil CESAR3 ainsi que les mesures des débits d'air dans le LESO et les mesures d'âge de l'air ont été financées par le NEFF. Les mesures sur l'installation de ventilation de l'ETHZ ont été faites sur mandat de l'OFEN, par l'intermédiaire de Ch. Fillieux (Basler + Hofmann, Zurich), dans le cadre de l'Annexe 18 "Demand Controlled Ventilation" du programme "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" de l'Agence Internationale de l'Energie. Que ces mécènes trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Les mesures dans l'installation de ventilation de l'ETHZ ont été effectuée avec un analyseur photoacoustique gracieusement prêté par Brüel et Kjaer, Renens.

Références

- [1] C.-A. Roulet, R. Brunner et al: Mesures in situ en énergétique du bâtiment. *Documentation SIA D027*, 1989. OCFIM, 3000 Berne, No 724 619 f et SIA, 8039 Zurich.
- [2] P. Charlesworth: Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques - An Applications Guide. *Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK*, 1988. (A commander chez P. Hartmann, EMPA, 8600 Dübendorf)
- [3] F. W. Sinden: Multi-chamber Theory of Air Infiltration. *Building and Environment*, 13, 1978, p 21-28
- [4] M. D. A. E. S. Perera : Review of Techniques for Measuring Ventilation Rates in Multi-celled Buildings. *Proc. of E. C. contractors meeting on natural ventilation, Bruxelles*, 1983.
- [5] M.H. Sherman: On the Estimation of Multizone Ventilation Rates from Tracer-Gas Measurements. *Building and Environment*, 24, pp 355-362, 1989.
- [6] H. Sutcliffe: Technical Note AIVC No 28: A Guide to Air Exchange Efficiency. *Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK*, 1990. (A commander chez P. Hartmann, EMPA, 8600 Dübendorf)
- [7] R. Compagnon, J.-M. Fürbringer, C. Roecker, C.-A. Roulet: Nouveaux développements de deux méthodes de mesures aérauliques dans les bâtiments. *Status Seminar 1988 über Energieforschung im Hochbau*, KWH, 1988.
- [8] C.-A. Roulet, R. Compagnon: Multizone Tracer Gas Infiltration Measurements: Interpretation Algorithms for Non-Isothermal Cases. *Building and Environment*, 24, 1989, pp 221-227.
- [9] A. Faist, J.-B. Gay, J.-L. Scartezzini, P.-A. Francelet, J.-P. Eggimann, D. Quévit: Projets NEFF 110, 110.1, 110.2, Le bâtiment LESO, Rapports de Synthèse. *LESO-EPFL*, 1985 et 1989.
- [10] A. Niclass, J.-P. Eggimann, J.-B. Gay: Convection naturelle et forcée dans les appartements munis de vérandas. *Rapport final du projet NEFF 339.6, LESO-PB, EPFL*, 1990
- [11] M. Sandberg, M. Sjöberg: The use of moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms. *Building and Environment* 18, pp 181-197, 1982.
- [12] D. Feneuille, D. Mathieu, R. Phan-Tan-Luu: Méthodologie de la recherche expérimentale. *Cours IPSOI*, R. H. Poincaré, F-13397 Marseille Cedex 13.
- [13] M. Meris, J.-B. Gay: Analyse des besoins énergétiques d'un bâtiment à l'aide des matrices d'expérience. *KWH Status Seminar, Zürich*, 1990
- [14] C.-A. Roulet: Propagation des erreurs au travers des calculs d'interprétation des mesures. *Séminaire "La Mesure dans le Bâtiment"*, Chexbres, septembre 1989.

Applications de méthodes à gaz traceurs aux mesures aérauliques dans les bâtiments et les systèmes de ventilation.

*Raphaël Compagnon, Martin Jakob, Claude-Alain Roulet
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
Département d'Architecture
Ecole Polytechnique Fédérale, 1015 Lausanne*

6. Schweizerisches Status-Seminar

Energieforschung im Hochbau

5./6. September 1990

ETH-Zürich

