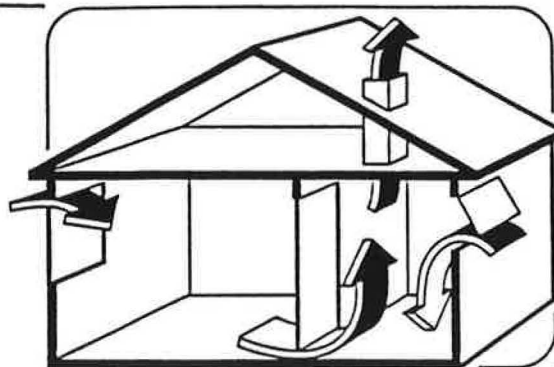


Mesures par gaz traceurs des échanges aérauliques dans les bâtiments : situation actuelle de la recherche

Projet NEFF 339.2 : rapport intermédiaire I

R. Compagnon
C.-A. Roulet
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
Bâtiment LESO - EPFL
CH - 1015 Lausanne

Décembre 1988



Mesures par gaz traceurs des échanges aérauliques dans les bâtiments : situation actuelle de la recherche

Projet NEFF 339.2 : rapport intermédiaire I

R. Compagnon
C.-A. Roulet
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
Bâtiment LESO - EPFL
CH - 1015 Lausanne

Décembre 1988



INTRODUCTION

Dans le domaine de l'étude des mouvements aérauliques dans les bâtiments, les techniques de mesure par gaz traceurs sont communément utilisées. Depuis les premiers travaux de J.B. Dick dans les années 50 [1], plusieurs techniques de mesures par gaz traceurs ont été développées et répertoriées par de nombreux auteurs [2 à 9].


Le tableau 1 classifie ces différentes techniques selon leur utilisation pour une caractérisation monozone ou multizone des bâtiments. Dans le premier cas on cherche à mesurer les renouvellements d'air avec l'extérieur sans se préoccuper des échanges d'air interzones dans le bâtiment. Ces mesures permettent, d'une part, d'évaluer les pertes thermiques dues au renouvellement de l'air intérieur par l'air frais venu de l'extérieur et, d'autre part, de juger de la qualité de la ventilation (dilution des polluants générés à l'intérieur du bâtiment par l'apport d'air frais extérieur). Dans le second cas (mesures multizones), en plus des échanges d'air avec l'extérieur, on cherche à mesurer les débits d'air interzones. La connaissance de ces débits permet, d'une part, de calculer les échanges d'énergie interzones par transferts de masses d'air et, d'autre part, d'étudier la migration de polluants à l'intérieur d'un bâtiment.

Parmi les diverses techniques de mesures par gaz traceurs on peut distinguer deux groupes :

- 1) Les techniques qui n'utilisent qu'un seul gaz (monogaz). Ce sont les premières qui ont été développées pour des mesures monozones. Elles ont récemment fait l'objet de plusieurs développements en vue de mesures multizones.
- 2) Les techniques multigaz permettant des mesures multizones qui font l'objet de nombreux développements à l'heure actuelle.

En plus de la détermination des débits d'air dans les bâtiments, les techniques de mesures par gaz traceurs sont de plus en plus employées pour la caractérisation de système de ventilation (naturelle ou mécanique) et l'évaluation de leur efficacité [79 à 91].

Ordre approximativement chronologique des développements



Techniques de mesures	Monozone	Multizone	
	Monogaz		Multigaz
Décrément logarithmique (decay)	[1 à 3] [5 à 9] [11 à 31]	[4] [44 à 53]	[4] [6] [8,9] [58 à 70]
Injection constante	[2, 3] [5 à 9] [19] [21] [26] [28] [32]	[19] [50] [54, 55]	[4 à 6] [8, 9] [64] [71 à 76]
Concentration constante CCTG	[2, 3] [5, 6] [8 à 10] [25] [27] [33 à 43] [92 à 97] [102]	[43] [56, 57]	[4] [77, 78] [101]

Tableau 1 : Classification des différentes techniques de mesures par gaz traceurs en fonction du type de mesures (monozones ou multizones) et du nombre de gaz utilisé (monogaz ou multigaz). Les chiffres indiqués dans chaque case renvoient aux références.

2. MESURES MONOZONES PAR TECHNIQUES MONOGAZ

Comme le grand nombre de références publiées à son sujet en atteste (cf tableau 1), la technique de mesure par décrémentation logarithmique est la plus couramment utilisée. Elle consiste à déduire le taux de renouvellement d'air de la vitesse de décroissance de la concentration d'un gaz traceur injecté préalablement. Les principaux avantages de cette technique résident dans son faible coût et sa facilité de mise en oeuvre. L'analyse des concentrations en gaz traceur peut se faire soit in-situ durant l'expérience, soit en laboratoire après l'expérience qui ne consiste alors qu'en la prise d'échantillons d'air après dispersion d'une certaine quantité de gaz. Cette technique est par contre difficilement utilisable lorsque les taux de renouvellement d'air varient rapidement (notamment en présence d'occupants dans le bâtiment). De plus l'interprétation des mesures est particulièrement délicate pour des bâtiments divisés en plusieurs zones simultanément mesurées. Néanmoins les pays nordiques et les Etats-Unis ont édicté des normes pour la détermination des taux de renouvellement en air frais à l'aide de cette technique [11 à 13].

La technique à injection constante consiste à déduire le débit d'air frais de la concentration d'équilibre obtenue lorsque le gaz traceur est injecté à débit constant. Elle est moins répandue notamment parce qu'elle est plus coûteuse en gaz tout en présentant les mêmes désavantages que la technique du décrémentation logarithmique.

Les désavantages des deux précédentes méthodes n'existent par contre pas pour la technique à concentration constante où le débit d'air est quasi proportionnel au débit de gaz traceur nécessaire à maintenir une concentration de consigne. Cette méthode permet la détermination simultanée des taux de renouvellement d'air (même variables) de plusieurs zones adjacentes en présence d'occupants. Bien que sophistiquée et reconnue comme étant la plus précise, cette technique reste toutefois coûteuse en raison de la complexité de sa mise en oeuvre qui nécessite le contrôle permanent de la concentration en gaz traceur durant l'expérience. C'est probablement ce qui explique que, jusqu'à aujourd'hui, seuls les pays nordiques aient édicté une norme sur la mesure continue des taux de renouvellement d'air à l'aide de cette technique [10]. Cependant, comme en témoignent les nombreuses références répertoriées dans le tableau 1, plusieurs systèmes de mesures ont été développés sur la base de cette technique dans le monde et ont déjà servi à de nombreuses campagnes de mesures sur des bâtiments habités. Ces campagnes ont entre autre permis de quantifier l'effet des occupants sur le renouvellement d'air [37] [96]. En Suisse notre laboratoire a développé un tel système dénommé CESAR (Compact Equipment for Survey of Air Renewal) permettant la mesure des taux de renouvellement d'air dans 10 zones simultanément [92].

3. MESURES MULTIZONES PAR TECHNIQUES MONOGAZ

Lorsqu'un bâtiment est divisé en N zones ($N \geq 2$) distinctes, on compte au maximum $N \cdot (N + 1)$ débits d'air reliant les zones entre elles et avec l'extérieur. En écrivant les équations de conservation de la masse de gaz traceur et de la masse d'air pour chaque zone, on obtient $2N$ équations qui ne suffisent donc pas à déterminer les $N \cdot (N + 1)$ débits. Le problème des techniques monogaz pour des mesures multizones consiste donc à générer suffisamment d'équations pour être en mesure de déterminer tous les débits. Les deux procédés utilisés à cet effet consistent soit à combiner les résultats de diverses expériences pour lesquelles le gaz traceur est réparti différemment entre les zones, soit à combiner plusieurs mesures d'une même expérience lors de laquelle les concentrations de chaque zone ont varié.

Le premier procédé est le plus fiable mathématiquement parlant mais les débits d'air mesurés de cette manière n'ont de sens que si les débits réels sont restés constants durant toutes les expériences nécessaires. Cette restriction exclut donc toute utilisation sur un bâtiment habité ainsi qu'en présence de conditions climatiques variables. De telles procédures appliquées avec les techniques du décrétement logarithmique et de l'injection constante, ont cependant été utilisées avec succès en laboratoires sur des chambres tests [47] ainsi que dans des bâtiments inoccupés [53]. Ce genre de mesure permet d'étudier la quantification des échanges d'air naturellement induits entre les zones en rapport avec la disposition et la section des ouvertures qui les relie (portes, cage d'escalier, par exemple).

Le second procédé (génération du nombre d'équations nécessaires en combinant plusieurs mesures de la même expérience) permet d'évaluer les débits interzones dans un laps de temps plus court mais est susceptible de donner lieu à un ensemble d'équations très mal conditionné; les débits qui en sont déduits sont alors entachés de larges marges d'erreur.

D'intéressantes applications de cette procédure qui dérivent de la méthode à injection constante ont été expérimentées sur des bâtiments occupés; elles utilisent le gaz carbonique généré par les occupants comme gaz traceur [54 et 55]. De telles applications nécessitent en permanence la connaissance du nombre d'occupants présents dans chaque zone; les taux d'injection de CO_2 sont alors évalués simplement en considérant un taux moyen constant pour chaque occupant.

La technique du décrétement logarithmique a également été appliquée aux mesures multizones à l'aide de ce second procédé [49].

Deux récents articles décrivent deux méthodes de mesures multizones dérivant de la technique à concentration constante [56 et 57]. Dans le premier cas les échanges aérauliques interzones sont déduits de l'évolution des concentrations lorsque la concentration de consigne est temporairement fixée à 0 dans une zone. Cette méthode a déjà été testée

avec succès sur un bâtiment inoccupé. Le second article propose une méthode consistant à faire varier la concentration de consigne entre deux niveaux au cours du temps selon une séquence pseudo-aléatoire. Cette méthode a été uniquement testée par simulations et semble donner de bons résultats.

4. MESURES MULTIZONES PAR TECHNIQUES MULTIGAZ

Le principe général de ces techniques consiste à établir pour chaque zone, une équation de conservation de la masse pour chaque gaz traceur. En employant M gaz ($MN + N$) équations peuvent alors être établies pour la détermination des $N \cdot (N+1)$ débits d'air possibles. Idéalement il serait nécessaire d'employer autant de gaz qu'il y a de zones ($M = N$) mais, dans la pratique, plusieurs débits interzones étant nuls de par la disposition même des zones, il est possible d'utiliser un moins grand nombre de gaz ($M < N$).

Par rapport aux techniques multizones monogaz, les techniques multigaz conduisent généralement à des systèmes d'équation beaucoup mieux conditionnés qui permettent une détermination plus précise des échanges d'air interzones et avec l'extérieur.

Depuis quelques années, un grand nombre de méthodes multigaz utilisant la technique du décrétement logarithmique ont été développées [58 à 70]. Elles ont déjà été appliquées avec succès sur plusieurs bâtiments généralement inoccupés.

Simultanément, une nouvelle technique multigaz à injection constante utilisant des capteurs passifs a été développée au Brookhaven National Laboratory (BNL) [71 à 76] et est maintenant utilisée commercialement aux USA. Cette technique a été spécialement développée dans le but de disposer d'un système de mesure fiable et peu coûteux pour des campagnes de longues durées sur plusieurs bâtiments. Un récent article [75] montre que les résultats obtenus par cette technique sous-estiment notablement les échanges d'air interzones si ceux-ci ont varié significativement durant la mesure. Par contre les résultats permettent de caractériser les migrations interzones de substances polluantes générées à un taux constant. Cette méthode est ainsi d'une grande utilité pour l'étude de la qualité de l'air dans les bâtiments.

La technique multigaz à concentration constante est aujourd'hui encore en développement au Lawrence Berkeley Laboratory (USA), au Technological Institute de Copenhague (Danemark) [78], en Nouvelle-Zélande (Building Research Association) [77], ainsi que dans notre laboratoire [101]. L'intérêt de cette technique réside principalement dans la possibilité de son utilisation sur des bâtiments habités.

5. PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Depuis le début des années 80, l'intérêt de plus en plus manifeste pour l'étude de la qualité de l'air dans les bâtiments a rendu nécessaire le développement de techniques de mesures multizones. Celles-ci ont connu de nombreux développements dérivant des méthodes à décrétement logarithmique et à injection constante. L'adaptation de la technique à concentration constante en vue de mesures multizones est encore en cours de développement :

- ◆ La stratégie d'injection du (ou des) gaz traceur(s) doit être élaborée de façon à obtenir un ensemble de mesures permettant d'en tirer les débits aérauliques le plus précisément possible.
- ◆ L'algorithme d'interprétation des mesures doit être choisi de manière à être peu sensible aux incertitudes sur les grandeurs mesurées et doit pouvoir fournir une estimation des intervalles de confiance autour de ses résultats.

Ce dernier point est particulièrement peu traité par la plupart des articles qui, par contre, mettent principalement l'accent sur les caractéristiques techniques ("hardware") des installations de mesures. Curieusement aussi, la totalité des références traitant des méthodes à gaz traceurs ne tiennent aucun compte, dans l'interprétation des mesures, de la variation de la densité de l'air en fonction de la température. Dans la référence [103] nous montrons que cette négligence peut entraîner des erreurs de l'ordre de 10% sur les débits aérauliques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment lorsque les différences de températures sont grandes (hiver). L'introduction de la température de l'air dans l'algorithme d'interprétation semble donc nécessaire ceci d'autant plus que les mesures devront servir à la validation de codes de calculs aérauliques [98] (projet NEFF 339.1 : "Programmes de calcul détaillés et simplifiés des échanges d'air dans le bâtiment : validation à l'aide de mesures expérimentales").

Une réserve souvent émise à propos des mesures par gaz traceurs concerne la validité des résultats dans le cas d'une distribution non homogène du gaz traceur dans les zones. Un certain nombre de remarques, généralement empiriques, sont mentionnées dans les références. Une étude expérimentale plus systématique de ce problème devrait permettre de mieux cerner les limites des méthodes à gaz traceurs et, éventuellement, de pouvoir se passer des ventilateurs de brassage lors des campagnes de mesures; ceux-ci introduisent des perturbations indésirables dans les zones (destruction de la stratification en température, courants d'air).

Il est maintenant bien établi que l'effet de l'occupant est déterminant sur les cheminements de l'air dans un bâtiment. La technique multigaz à concentration constante semble être la plus apte à quantifier cet effet.

6. CONCLUSIONS

L'expérience acquise par notre laboratoire avec la première installation CESAR [92 à 97] nous a permis de nous engager dans le développement d'une installation à concentration constante utilisant 3 gaz (CESAR 3). Par ce développement, notre laboratoire contribue directement à l'effort de recherche international dans le domaine de l'étude multizone de la ventilation. La possibilité d'utilisation de cette installation sur des bâtiments occupés constitue également un objectif essentiel.

Dans un second temps, dans le cadre de ce même projet, nous entreprendrons de mettre en oeuvre la technique multigaz à injection constante et capteurs passifs du BNL. Certaines améliorations de cette technique sont même entrevues.

Disposant de ces deux nouvelles techniques multizones et d'un bâtiment (le LESO) bien instrumenté, notre laboratoire sera ainsi en mesure de fournir un ensemble de mesures de haute qualité pour la validation de codes de calculs. L'intérêt marqué au niveau international pour cet ensemble de mesures nous confirme dans notre but. D'autre part, ces deux nouvelles techniques constitueront des outils disponibles pour des campagnes de mesures sur des bâtiments existants utiles à d'autres projets menés en Suisse.

REFERENCES

(Les chiffres notés # correspondent à la numérotation donnée dans le répertoire AIRBASE de l'AIVC 'Air Infiltration and Ventilation Center').

- [1] Dick J.B., "Measurement of ventilation using tracer gas", Heating Piping & Air Conditioning Vol. 22 N° 5, 1950 (# 149).
- [2] Hitchen E.R., Wilson C.B., "A review of experimental techniques for the investigation of natural ventilation in buildings", Building Science Vol. 2 N° 1, 1967 (# 66).
- [3] Sherman M.H., Grimsrud D.T., Condon P.E., Smith B.V., "Air infiltration measurement techniques", 1st AIC Conference "Air infiltration and measuring techniques", Proceedings, 1980 (# 611).
- [4] Perera M.D.A.E.S. "Review of techniques for measuring ventilation in multi-celled buildings", Proceedings of the EC Contractor's meeting, Brussels, 1982 (#1182).
- [5] Harrje D.T., Dutt G.S., Bohac D.L. et al., "Documenting air movements and infiltration in multicell buildings using various tracer-gas techniques", ASHRAE transactions Vol. 91 part 2, 1985 (# 1862).
- [6] Lagus P., Persily A.K., "A review of tracer gas techniques for measuring airflows in buildings", ASHRAE transactions Vol. 91 part. 2B, 1985 (# 2277).
- [7] Farant J.P., Mc Kinnon D.L., Mc Kenna T.A., "Tracer gases as a ventilation tool : methods and instrumentation", Ventilation'85 (Chemical Engineering Monographs 24), 1986 (# 2216).
- [8] Charlesworth P.S., "Measurement techniques for ventilation and air leakage", 8th AIVC Conference "Ventilation technology, research and application", Proceedings, 1987 (# 2682).
- [9] Charlesworth P.S., "Air exchange rate and airtightness measurement techniques - An application guide", AIVC, 1988.
- [10] Nordtest, NT VVS 048, "Buildings : total flow rate of air- Continuous measurement.
- [11] Nordtest, NT BUILD 232, "Buildings : rate of ventilation in different parts of a building".
- [12] Building Standards Institute, Stockholm, Sweden, SS02 15 56, "Buildings : determination of outdoor air inflow".

- [13] ASTM, E741-83, "Standard test method for determining air leakage rate by tracer dilution" (# 2888).
- [14] Harrje D.T., Hunt C.M., Treado S.J., Malik N.J., "Automated instrumentation for air infiltration measurements in buildings", Center for Environmental Studies, Report N° 13, Princeton University, 1975 (# 209).
- [15] Kumar R., Ireson A.D., Orr H.W., "An automated air infiltration measuring system using SF₆ tracer gas in constant concentration and decay methods", ASHRAE transaction Vol. 85 part 2, 1979 (# 284).
- [16] Grimsrud D.T., Sherman M.H., Janssen J.E., Pearman A.N., Harrje D.T., "An intercomparison of tracer gases used for air infiltration measurements", ASHRAE transactions, Vol. 86 part 1, 1980 (# 200).
- [17] Hartmann P., Mühlebach H., "Automatic measurements of air change rates (decay method) in a small residential building without any forced air heating system", 1st AIC Conference "Air Infiltration and Measuring Techniques", Proceedings, 1980 (# 612).
- [18] Grot R.A., Hunt C.M., Harrje D.T., "Automated air infiltration measurements in large buildings", 1st AIC Conference, Proceedings, 1980 (# 653).
- [19] Condon P.E., Grimsrud D.T., Sherman M.H., Kammerud R.C., "An automated controlled-flow air infiltration measurement system", ASTM stp 719, 1980 (# 95).
- [20] Bassett M.R., Shaw C.Y., Evans R.G., "An appraisal of the sulfur hexafluoride decay technique for measuring air infiltration rates in buildings", ASHRAE transactions, Vol. 87 part 2, 1981 (# 991).
- [21] Turiel I., Rudy J.V., "Occupant generated CO₂ as an indicator of ventilation rate", ASHRAE transactions, Vol. 88 part 1, 1982 (# 1062).
- [22] Shaw C.Y., "The effect of tracer gas on the accuracy of air change measurements in buildings", ASHRAE transactions, Vol. 90 part 1A, 1984 (# 1474).
- [23] Ninane P., "Infiltration naturelle : test au gaz traceur", Université de Liège, Laboratoire de Physique du Bâtiment (# 1443).
- [24] Boman C.A., Lyberg M.D., "Measured and building code values of air change rates in residential buildings", 5th AIC Conference "The implementation and effectiveness of air infiltration standards in buildings", Proceedings, 1984 (# 1593).

- [25] Sandberg M., Blomqvist C., "A quantitative estimate of the accuracy of tracer gas methods for the determination of the ventilation flow rate in buildings", *Building and Environment*, Vol. 20 N° 3, 1985 (# 1947).
- [26] Parker G.B., "The measurement of air exchange rates in residential and commercial buildings in the Northwest : techniques and results", *Geosciences Research and Engineering Department*, Washington, 1986 (# 2491).
- [27] Sandberg M., "Predicting a time-varying flow rate using the constant concentration and decay technique", *ASHRAE transactions*, Vol. 93, part 1, 1987 (# 2367).
- [28] Heidt F.D., Werner H., "Microcomputer-aided measurement of air change rates", *Energy and Buildings* Vol. 9, 1986 (# 2536).
- [29] Sorteri J., Seppänen O., Majanen A., "A method for field measurements of ventilation rates with CO₂ indicator tubes", *Roomvent 87, Proceedings*, 1987 (# 2651).
- [30] Alevantis L.E., Hayward S.B., "A computer controlled system for measuring building air exchange rates using sulfur hexafluoride as a tracer gas", *Indoor Air'87, Proceedings* Vol. 3, 1987 (# 2804).
- [31] Niemela R., Aalto H., Tossavainen A., "Evaluation of low cost tracer techniques for measuring air exchange rates in buildings", *Indoor Air'87 Proceedings* Vol. 3, 1987 (# 2822).
- [32] Freeman J., Gale R., Lilly J.P., "Ventilation measurements in large buildings", *4th AIC Conference "Air infiltration reduction in existing buildings"*, *Proceedings*, 1983 (# 1253).
- [33] Collet P.F., "Continuous measurements of air infiltration in occupied dwellings", *2nd AIC Conference "Building design for minimum air infiltration"*, *Proceedings*, 1981 (# 977).
- [34] Lundin L. Aiff O., Blomsterberg A., "An automated air infiltration measurement system - its design and capabilities : preliminary experimental results", *Swedish National Testing Institute*, 1983.
- [35] Michell D., Biggs K.L., "Outline of an apparatus for continuous monitoring of air infiltration in houses", *CSIRO Division of Building Research*, 1983 (# 2548).
- [36] Etheridge D.W., "Application of the constant concentration technique for ventilation measurement to large buildings", *SERC Workshop on Ventilation*, 1984 (# 1513).

- [37] Kvisgaard B., Collet P.F., Kure J., "Research on fresh-air change rate : 1. occupants'influence on air-change", Technological Institute of Copenhagen, 1985 (# 1752).
- [38] Bohac D.L., Harrje D.T., "Improving the accuracy of a constant concentration tracer gas system", 6th AIC Conference "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings 1985 (# 1796).
- [39] Bohac D., Harrje D., Norford L.K., "Constant concentration infiltration measurement technique : an analysis of its accuracy and field measurements", ASHRAE/DOE/BTECC Conference : "Thermal performance of the exterior envelopes of buildings III, 1985.
- [40] Bohac D.L., "The use of a constant concentration tracer gas system to measure ventilation in buildings", PV CEES Report N° 205, 1986 (# 2076).
- [41] Kvisgaard B., Collet P.F., "Occupants'influence on air change rate in dwellings", 7th AIVC Conference : "Occupant interaction with ventilation systems", Proceedings, 1986 (# 2305).
- [42] Sherman M.H., Wilson D.J., "Relating actual and effective ventilation in determining indoor air quality", Building and Environment Vol. 21 N° 3/4, 1986 (# 2456).
- [43] Collet P.F., Egedorf M., "Ten years of constant concentration tracer gas measurements", Air Infiltration Review Vol. 9 N° 2, 1988.
- [44] Sinden F.W., "Multi-chamber theory of air infiltration", Building and Environment Vol. 13 N° 1, 1978 (# 5).
- [45] Dewsbury J., "Use of a single tracer gas for measurement of ventilation rates in a large enclosure", 6th AIC Conference, "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings, 1985 (# 1795).
- [46] Perera M.D.A.E.S., Walker R.R., Oglesby O.D., "Infiltration measurements in naturally ventilated, large multicelled buildings", Ventilation'85, Elsevier, 1986 (# 2226).
- [47] Afonso C.F.A., Maldonado E.A.B., Skaret E., "A single tracer-gas method to characterize multi-room air exchanges", Energy and Buildings Vol. 9, 1986 (# 2537).
- [48] Waters J.R., Simons M.W., "The evaluation of contaminant concentrations and air flows in a multizone model of a building", Building and Environment Vol. 22 N° 4, 1987 (# 2850).

- [49] Simons M.W., Waters J.R., "The measurement of ventilation and air movement in factory buildings", ICBEM'87 Proceedings Vol. 3, 1987 (# 2718).
- [50] Afonso C.F.A., Maldonado E.A.B., "A tracer-gas procedure for the simultaneous evaluation of effective volumes and multizone airflows", ICBEM'87 Proceedings Vol. 3, 1987 (# 2719).
- [51] Riffat S.B., "Measurement of air flows between the upper and lower floors of a storey house", RIB Polytechnic of central London, internal report, 1987 (# 2725).
- [52] Lawrence G.V., Waters S.R., "Measurements of infiltration and air movement in five large single-cell buildings", 8th AIVC Conference, "Ventilation Technology Research and Application", Proceedings, 1987 (# 2683).
- [53] Riffat S.B., Eid M., "Measurement of air flow between the floors of houses using a portable SF₆ system", Energy and Building Vol. 12, 1988 (# 2926).
- [54] Penman J.M., Rashid A.A.M., "Experimental determination of air-flow in a naturally ventilated room using metabolic carbon dioxide", Building and Environment Vol. 17 N° 4, 1982 (# 1115).
- [55] Smith P.N., "Determination of ventilation rates in occupied buildings from metabolic CO₂ concentrations and production rates", Building and Environment Vol. 23 N° 2, 1988.
- [56] Bohac D.L., Harrje D.T., "The use of modified constant concentration techniques to measure infiltration and interzone air flow rates", 8th AIVC Conference, "Ventilation technology - Research and Application", Proceedings, 1987 (# 2745).
- [57] Jensen L., "Determination of flows and volumes in multiple cell systems", Roomvent-87, 1987 (# 2654) and Air Infiltration Review Vol. 9 N 2, 1988 (# 2921).
- [58] I'Anson S.J., Irwin C., Howarth A.T., "Air flow measurement using three tracer gases", Building and Environment Vol. 17 N° 4, 1982 (# 1114).
- [59] Littler J., Prior J., "Development of a multi-tracer gas technique for observing air movement in buildings", Polytechnic of Central London, report RIB/83/913/1, 1983 (# 1900).
- [60] Littler J., Martin C., Prior J., "Automation, extension and use of the PCL multi-tracer gas technique for measuring interzonal air flows in buildings", Polytechnic of Central London, report RIB/1985/718, 1985 (# 1843).

- [61] Prior J.J., Martin C.J., Littler J.G.F., "An automatic multi-tracer-gas method for following interzonal air movement", ASHRAE Annual Meeting, 1985 (# 1863).
- [62] Irwin C., Edwards R.E., Howarth A.T., "The measurement of airflows using a rapid response tracer gas technique", Building Services and Engineering Research and Technology Vol. 6 N° 4, 1985 (# 1992).
- [63] Walker R.R., "Interpretation and error analysis of multi-tracer gas measurements to determine air movement in a house", 6th AIC Conference : "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings, 1986 (# 1975).
- [64] Fisk W.J., Binenboym J., Kaboli H., Grimsrud D.T., Robb A.W., Weber B.J., "A multi-tracer system for measuring ventilation rates and ventilation efficiencies in large mechanically-ventilated buildings" 6th AIC Conference Proceedings, 1985 (# 1977).
- [65] Irwin C., "A method of measuring air movements in compartmentalized buildings", PhD Thesis, UMIST, 1985 (# 2662).
- [66] Prior J.J., "A new multi-tracer gas technique for measuring interzonal air flows in buildings", PhD Thesis, Polytechnic of Central London, 1985 (# 2663).
- [67] Irwin C., Edwards R.E., "The validation of a multiple tracer gas technique for the determination of airflows between three interconnected cells", Air Infiltration Review, Vol. 7 N° 4, 1986.
- [68] Nimelä R., Toppila E., Tossavainen A., "A multiple tracer gas technique for the measurement of airflow patterns in large industrial premises", Building and Environment, Vol. 22 N° 1, 1987.
- [69] Edwards R.E., Irwin C., "The measurement of air movements between four interconnected cells by a multiple tracer gas decay technique", Roomvent-87 Proceedings, 1987 (# 2645).
- [70] Axley J., Persily A., "Integral mass balances and pulse injection tracer techniques", 9th AIVC Conference "Effective Ventilation", Preprints Vol. 1, 1988.
- [71] Dietz R.N., Cote E.A., "Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique", Environment International, Vol. 8, 1982 (# 1129).
- [72] Dietz R.N., Goodrich R.W., Cote E.A., Wieser R.F., "Brookhaven air infiltration measurement system (BNL/AIMS) description and application", Brookhaven National Laboratory, Informal report 33846, 1983 (# 1737).

- [73] Dietz R.N., Goodrich R.W., Cote E.A., Wieser R.F., "Detailed description and performance of a passive perfluorocarbon tracer system for building ventilation and air exchange measurements", ASTM Symposium on Measured Leakage Performance of Buildings, 1985 (# 1732).
- [74] Dietz R.N., D'Ottavio T.W., Goodrich R.W., "Multizone infiltration measurements in homes and buildings using a passive perfluorocarbon tracer method" ASHRAE transactions Vol. 91 part 2, 1985 (# 1833).
- [75] Shermann M.H., "Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques", submitted to Building and Environment, LBL-23088, 1987.
- [76] D'Ottavio T.W., Senum G.I., Dietz R.N., "Error analysis techniques for perfluorocarbon tracer derived multizone ventilation rates", Building and Environment Vol. 23 N° 3, 1988.
- [77] Bassett M.R., "Natural airflows between roof, subfloor and living spaces", 9th AIVC Conference "Effective Ventilation", 1988.
- [78] Kvisgaard B., Collet P.F., "Constant concentration measurement with 2 tracers", 9th AIVC Conference, "Effective Ventilation", 1988.
- [79] Sandberg M., "What is ventilation efficiency", Building and Environment Vol. 16 N° 2, 1981 (# 812).
- [80] Sandberg M., Sjoberg M., "The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms", Building and Environment Vol. 18 N° 4, 1983 (# 1320).
- [81] Sandberg M., "The multi-chamber theory reconsidered from the viewpoint of air quality studies", Building and Environment Vol. 19 N° 4, 1984 (# 1608).
- [82] Dickson D.J., "Ventilation efficiency measurements in occupied mechanically ventilated buildings", 6th AIC Conference, "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings, 1985 (# 1797).
- [83] Persily A.K., Grot R.A., "Ventilation system performance evaluation using tracer gas techniques", 6th AIC Conference, "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings, 1985 (# 1810).
- [84] Sherman M.H., Wilson D.J., "Relating actual and effective ventilation in determining indoor air quality", Building and Environment Vol. 21 N° 3/4, 1986 (# 2456).

- [85] Helenius T., Seppänen O., Maranen A. et al., "Measurement of air exchange efficiency and ventilation effectiveness", Roomvent 87, Proceedings, 1987 (# 2649).
- [86] Lefevre A., Muller J.P., "Application of the tracer gas method to the evaluation of local and general ventilation in a workshop - a case study", Roomvent 87, Proceedings, 1987 (# 2643).
- [87] Kvisgaard B., Collet P.F., "Tracer gas used to evaluate HVAC equipment", 8th AIVC Conference "Ventilation technology - Research and application", Proceedings, 1987 (# 2685).
- [88] Breum N.O., Skotte J., "A portable unit for measuring ventilation efficiency", 8th AIVC Conference "Ventilation technology - research and application", Proceedings, 1987 (# 2697).
- [89] Ancker K., Gothe C.J., Bjurstrom R., "A quantitative method for measuring air recirculation", Indoor Air'87, Proceedings, 1987 (# 2801).
- [90] Presser K.H., Becker R., "Mit Lachgas dem Luftstrom auf der Spur; Luftstrommessung in Raumluftechnischen Anlagen mit Hilfe der Spurgasmethode", Heiz. Luft Haustech. Vol. 39 N° 1, 1988 (# 2883).
- [91] Fisk W.J., Prill R.J., Seppänen O., "Commercial building ventilation measurements using multiple tracer gas", 9th AIVC Conference "Effective ventilation" Preprints, 1988.

Publications du LESO-PB relatives aux mesures aérauliques par gaz traceurs :

- [92] Scartezzini J.-L., Roecker C., Quévit D., "Mesures du taux de renouvellement d'air à l'aide d'un dispositif compact à concentration constante", in 3. Schweizerisches Status-Seminar Wärmeschutz-Forschung im Hochbau, EMPA, Dübendorf, 1984 (# 1570).
- [93] Scartezzini J.-L., Roulet C.-A., Jolliet O., "Continuous air renewal measurements in different inhabited buildings", 6th AIC Conference "Ventilation strategies and measurement techniques", Proceedings, 1985 (# 1784).
- [94] Scartezzini J.-L., Roecker C., Quévit D., "Continuous air renewal measurements in an occupied solar office building", Proceedings Clima 2000, Vol. 2, 1985 (# 1816).
- [95] Quévit D., Roecker C., "Continuous air infiltration measurements in the LESO", Proceeding Intersol 85, 1985 (# 1819).

- [96] Roulet C.-A., Scartezzini J.-L., "Mesure du taux de renouvellement d'air dans la villa Roulet à Apples", rapport 84-01-10, LESO-PB EPFL, 1984 (# 1820).
- [97] Roulet C.-A., Scartezzini J.-L., "Measurement of air change rate in an inhabited building with a constant tracer gas concentration technique", in ASHRAE transactions 93 Part 1, 1987 (# 2882).
- [98] Scartezzini J.-L., Fürbringer J.-M., Roulet C.-A., "Data needs for purpose of air infiltration computer code validation", 8th AIVC Conference, "Ventilation technology - research and application", 1987 (# 2688).
- [99] Feustel H.E., Scartezzini J.-L., "Development and validation of a simplified multizone infiltration model", ICBEM'87 Proceedings, 1987 (# 2721).
- [100] Roulet C.-A., "Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden", 3. Weimarer Symposium, 1988.
- [101] Compagnon R., Fürbringer J.-M., Roecker C., Roulet C.-A., "Nouveaux développements de deux méthodes de mesures aérauliques dans les bâtiments", 5. Schweizerisches Status Seminar Enegieforschung im Hochbau, 1988.
- [102] Compagnon, R., Kohler A., Roecker C., Roulet C.-A., "Development of an efficient control algorithm for a multizone constant concentration tracer gas air infiltration measurement system", 9th AIVC Conference "Effective ventilation", 1988.
- [103] Roulet C.-A., Compagnon R., "Multi-zone tracer gas infiltration measurements interpretation algorithms for non isothermal cases", submitted to "Building and Environment", 1988.