



## Office fédéral de l'énergie

3003 Berne

### RAPPORT INTERMÉDIAIRE

Pour les travaux de recherche définis dans le mandat: 19063

**Titre du projet:**

**ATEMAC - Application des traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants**

**Résumé:**

Les gaz traceurs sont utilisés en Suisse depuis plus de 10 ans pour mesurer des débits d'air et des taux de ventilation ainsi que pour simuler le mouvement de contaminants. Les systèmes disponibles en Suisse sont précis et performants, mais relativement volumineux et coûteux, et nécessitent un temps de mise en œuvre important.

Les traceurs perfluorés permettent une injection par diffusion avec de petites sources autonomes et une détection en très faible concentration par accumulation dans des capteurs passifs. Leur mise en place est très rapide, et l'analyse de nombreux échantillons peut être effectuée de manière centralisée. L'analyse des capteurs passifs demande toutefois un laboratoire bien équipé, entraîné à des techniques délicates d'analyse. Le but du projet était d'introduire cette méthode dans des laboratoires suisses, nommément à l'EPFL et à l'EMPA.

Les études faites dans le cadre ce de contrat ont malheureusement montré que cette méthode, pourtant utilisée dans d'autres pays, est en fait inutilisable. Une partie importante et variable du gaz traceur est adsorbée par les matériaux présents dans les locaux mesurés,<sup>1</sup> ce qui conduit à une surestimation importante et incontrôlable des débits d'air. Le projet a donc été modifié, en maintenant l'objectif initial qui est de développer une méthode de mesure simple, bon marché et efficace des débits d'air dans les bâtiments.

Trois voies possibles seront explorées:

1. Méthode de l'Aérosol, utilisant un compteur de particules par photo-ionisation
2. Recherche et évaluation de nouveaux types d'analyseurs
3. Utilisation d'enregistrements de concentration de CO<sub>2</sub>.

Les deux premières voies ont pour but d'évaluer des méthodes de mesure de la concentration en traceur, et la troisième conduit à faciliter l'interprétation des mesures de concentration.

**Durée du projet:** 1.8.98 au 31.03.2001

**Mandataire:** Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment EPFL

**Rapporteur:** Claude-Alain Roulet

**Adresse:** LESO-PB, EPFL, CH 1015 Lausanne  
claude.roulet@epfl.ch

**Téléphone:** (021) 693 45 57                    **Télécopie:** (021) 693 27 22

<sup>1</sup> Hill, M., R. Gehrig, et al.: Are Measurements of Air Change Rates with the PFT-Method Biased by Sink and Temperature Effects? Healthy Buildings 2000, Helsinki.

## 1 OBJECTIFS

Le projet a pour but de développer ou d'acquérir une méthode pour déterminer de très faibles débits d'air ou la propagation de contaminants, d'équiper deux laboratoires ayant le savoir faire pour ce type de mesure, et de proposer une méthode d'interprétation adaptée à ce genre de mesures.

Les applications de cette méthode sont nombreuses:

- simulation de la diffusion de contaminants, par exemple le radon, dans les bâtiments ou à l'extérieur,
- mesure des débits d'air moyens dans les bâtiments ou les installations,
- mesure de l'efficacité de la ventilation
- détection de fuites de produits liquides ou gazeux,
- etc.

Dans le domaine de l'énergie, en particulier, on peut appliquer la méthode à:

- une campagne de mesure des taux de renouvellement d'air dans les bâtiments en relation avec le potentiel d'économie d'énergie par un assainissement possible,
- des étude de dispersion de polluants issus de centrales de production d'énergie,
- etc.

La méthode doit être applicable par des bureaux d'ingénieurs, mais l'analyse reste limitée a quelques laboratoires bien équipée. Le coût par analyse devrait se situer entre CHF 200.- et 1'000.-, suivant le nombre d'analyses demandées simultanément. Ce coût est très inférieur à celui d'une mesure utilisant des méthodes classiques.

## 2 TRAVAUX EFFECTUÉS

### 2.1 Méthodes de mesure

Le principe de l'utilisation d'un gaz traceur pour la mesure du débit d'air consiste à injecter une quantité ou un débit connu de gaz traceur<sup>2</sup>, et à en mesurer la concentration dans l'air après mélange. Cette concentration sera inversement proportionnelle à la quantité d'air dans laquelle le gaz se sera dilué, donc inversement proportionnelle au débit d'air neuf.

**La méthode traditionnelle**, ou active, consiste à injecter un gaz provenant d'une bouteille (dans le cas présent du protoxyde d'azote), et à prélever à l'aide d'une pompe des échantillons d'air qui sont immédiatement analysés en continu.

**La méthode passive** utilise des traceurs perfluorés, qui peuvent être analysés en très faible concentration par un détecteur à capture électronique. Pour la présente étude, nous avons utilisé les composés suivants:

	Composé	Composition	Masse molaire	Densité/air @NTP
PMCH	Perfluoro-methyl-cyclohexane	CF <sub>3</sub> C <sub>6</sub> F <sub>11</sub>	350	12.1
PDCH	Perfluoro-dimethyl-cyclohexane	CF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub> C <sub>6</sub> F <sub>10</sub>	400	13.8
PMCP	Perfluoro-methyl-cyclopentane	CF <sub>3</sub> C <sub>5</sub> F <sub>9</sub>	300	10.3

Ces composés sont liquides à température ambiante. Il sont diffusés dans la pièce en les laissant s'évaporer au travers d'un septum fermant le flacon contenant le composé.

L'air est aussi échantillonné de manière passive: Un tube contenant un produit absorbant (comme par ex. du charbon actif) est laissé ouvert. Les composés fluorés, ainsi que d'autres impuretés de l'air, s'adsorbent dans le produit et s'y accumulent. Après un certain temps, le tube est bouché et envoyé au laboratoire pour analyse. Cette analyse consiste à chauffer le tube pour en extraire les composés, à séparer ces composés dans une colonne de chromatographie, et à mesurer la concentration des composés fluorés.

### 2.2 Étape préliminaire

Le projet était organisé en deux étapes. L'étude préliminaire, qui comprenait une recherche bibliographique approfondie et une étude de marché, ainsi que quelques expériences préparatoires, a permis de préparer une proposition précise pour le déroulement de la seconde phase, qui a commencé en 1998 [Roulet et al, 1998].

<sup>2</sup> Un bon gaz traceur est facilement analysable à faible concentration, se mélange bien à l'air, et ne présente aucun danger aux concentrations utilisées.

## **2.2.1 Recherche bibliographique**

Une liste de références relatives à l'utilisation des perfréocycloalkanes comme gaz traceurs a été établie à l'aide de la base de données AIRBASE de l'Air Infiltration and Ventilation Centre. Cette liste a été augmentée de références connues

L'examen de 71 références a permis de se faire une bonne idée des diverses techniques utilisées dans ce domaine. Un rapport résumant l'information retirée de cette analyse a été établi [Roulet, 1997].

## **2.2.2 Analyse de marché**

Contact a été pris avec diverses sociétés susceptibles de fournir la technique. Les résultats de ces contacts sont résumés ci-dessous.

PentIAQ, à Gävle (Suède) a développé sa propre technique. Cette technique particulière consiste à extraire le traceur des échantillonneurs passifs par dilution dans un solvant, et c'est la solution qui est ensuite analysée par chromatographie. Ceci a l'avantage de simplifier l'analyse, et de permettre la répétition de cette analyse. Par contre, elle limite le nombre de traceurs à 2, et la dilution dans le solvant diminue nettement la sensibilité de la technique.

PentIAQ vend le service de mesure, mais pas la technique. Par contre, PentIAQ est disposé à accepter une collaboration, qui consisterait à contribuer au développement de leur méthode.

Le Danish Building Research Institute, à Horsholm, Danemark a acquis il y a dix ans la méthode du Russel Dietz, pionnier de ces techniques au Brookhaven National Lab. Le matériel est livré apr J. Booker & Co, au Texas. Le système de désorption des échantillonneurs est monté par l'université de Princeton. Ces deux derniers laboratoires doivent encore être contactés.

Building Research Institute Garston, UK a développé un système pour l'usage propre, basé sur du matériel commercial standard. Le BRE ne vend pas de technique, mais serait prêt à porter assistance, moyennant finances, pour un développement. La technique du BRE utilise, selon les dire de R. Walker, du matériel standard, qui peut aussi être utilisé pour d'autres types d'analyses.

## **2.3 Logiciel d'interprétation**

L'Office Fédéral de la Santé Publique, très intéressé par l'application possible de cette méthode aux problèmes de diffusion du radon, a ouvert, pour 1997, un crédit de 20'000.- permettant de travailler sur la méthode d'interprétation. Cette étude théorique a permis d'établir clairement les algorithmes d'interprétation, qui ont été décrits en détail dans le rapport préliminaire [Roulet et al, 1998].

## **2.4 Application aux unités de traitement d'air**

L'application des gaz traceurs perfluorés aux mesures de débits dans les installations de traitement d'air a été envisagée. Deux méthodes d'injection des gaz traceurs peuvent être utilisées pour cette application: soit les sources classiques, à diffusion, mais avec un débit adapté (voir ci-dessous), soit une injection pulsée, qui peut facilement se faire avec une micro-seringue. Pour éviter l'effet perturbateur des forts courants d'air régnant dans les conduites, l'échantillonnage doit être actif, une pompe aspirant l'air au travers du tube contenant le produit adsorbant.

La méthode d'interprétation développée dans le cadre du projet MéDITA [Roulet, Deschamps et al. 1999] s'appliquerait sans autre aux traceurs perfluorés [Roulet, 1999].

## **2.5 Sources et échantillonneurs de gaz traceurs**

1. De nouvelles sources de gaz traceur passives ont été développées. De nouvelles capsules ayant une plus faible ouverture et un nouveau type de septum émettent un débit nettement inférieur à celui des sources utilisées dans l'étude préliminaire. La consommation de gaz traceur est ainsi réduite. D'autre part, des sources à débit faible sont indispensable pour les mesures dans les volumes restreint.
2. A contrario, des sources à débit élevés sont nécessaires pour utiliser ces traceurs dans les installations de traitement d'air. Divers matériaux (feuilles de plastique minces) ont été essayées pour remplacer le septum à faible débit [Roulet, 1999].
3. Un nouveau matériau adsorbant, le Carboxen 569, présentant une plus grande capacité d'adsorption pour les gaz traceurs et une capacité d'adsorption moindre pour la vapeur d'eau est actuellement en examen. Ce matériau présente l'avantage d'offrir une plus grande dynamique de mesure, grâce à sa plus grande capacité. Sa faible absorption de la vapeur d'eau est en autre avantage, la colonne de chromatographie utilisée pour l'analyse étant sensible à la vapeur d'eau.

- Le débit des sources augmente en fonction de la température. Un taux de 4%/K a été mesuré à l'EMPA, ce qui est sensiblement plus que la valeur de 3%/K publiée par ailleurs. Notons que 4%/K implique une augmentation de 50% du débit lorsque la température augmente de 10 degrés.
- Un nouveau type de gaz traceur (le Methoxy-nonafluorobutane ou HFE 7100) se trouve sur le marché à une pureté suffisante pour le but poursuivi. Il a été testé et montre une mauvaise résolution dans la colonne de chromatographie utilisée pour les autres traceurs.

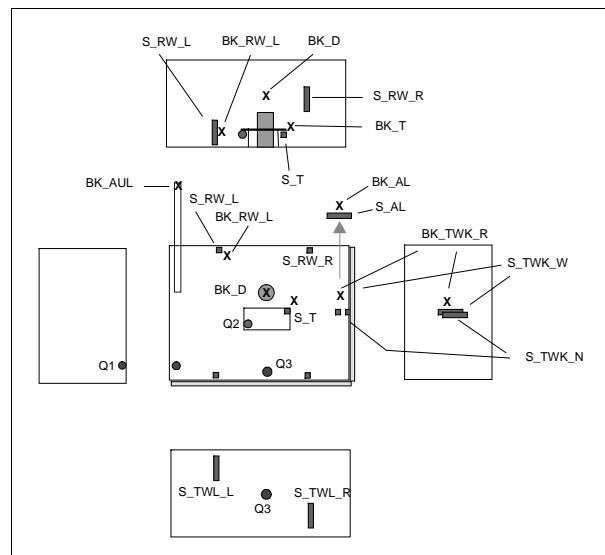
## 2.6 Validation de la méthode

### 2.6.1 Comparaison avec la méthode traditionnelle

Des mesures de débit d'air ont été effectuées dans la chambre climatique de l'EMPA en utilisant simultanément les traceurs perfluorés et un gaz traceur classique, injecté et échantillonné de manière active. Les essais avaient pour objectif de comparer les débits obtenus par les deux méthodes, d'une part à débit constant, et d'autre part à débit d'air variable, en simulant des ouvertures de fenêtre.



*Vue de la chambre climatique (à gauche) et de l'emplacement des source et des échantillonneurs (à droite)*



Un plan d'expérience multifactoriel selon Hadamard a été établi comme suit:

No	Débit de base		Débit additionnel		Chauffage	Température de fenêtre [°C]	Date de l'essai
	Débit [m³/h]	Durée [h]	Débit [m³/h]	Durée [h]			
1	85	-	-	-	en	17	10.9.99
2	85	-	-	-	hors	20	08.7.99
3	50	6.67	250	1.33	en	17	
4	255	-	-	-	en	17	
5	150	2.22	750	0.44	hors	20	
6	255	-	-	-	hors	20	20.7.99
7	50	6.67	250	1.33	hors	20	14.7.99

Lorsque le chauffage est enclenché, la différence de température entre l'air extrait et l'air pulsé étant de 7 K. Elle était nulle dans le cas contraire.

Les expériences ont été interrompues lorsqu'il s'est avéré que les gaz traceurs s'adsorbent sur les surfaces.

### 2.6.2 Adsorption des gaz traceurs

Il est apparu dans plusieurs expériences que le débit d'air déterminé à partir de la concentration de PFT était nettement supérieur au débit mesuré avec la méthode traditionnelle, utilisant un traceur (protoxyde d'azote) naturellement gazeux à température ambiante. Ce résultat revient à dire qu'une partie des perfréons injectés dans la pièce disparaît ou n'est pas échantillonnée.

Pour déterminer les causes de ces pertes, plusieurs expériences ont été effectuées dans différentes chambres, en comparant la méthode passive avec d'une part la méthode active et d'autre part, avec un échantillonnage actif des PFT.

### ***Chambre de calibration***

L'étalonnage de la méthode a été effectuée dans une chambre entièrement en acier inoxydable, dont le taux de renouvellement d'air est connu. La quantité de gaz injecté est connue, donc la quantité de tracer que l'on peut récupérer théoriquement dans les échantillonneurs peut être prédite. Les mesures à 23°C ont été prises comme références. Des mesures supplémentaires ont été effectuées à 16 et 28°C, pour mettre en évidence un effet d'adsorption, qui devrait être plus marqué à basse température qu'à haute température.

*Table 1: Concentrations mesurées dans la chambre de calibration, rapportées aux concentrations mesurées à 23°C*

	PMCP	PMCH	PDCH
16°C	94%	109%	106%
23°C	100%	100%	100%
28°C	98%	105%	95%

On notera que, dans cette chambre, la concentration mesurée est proche de la concentration calculée, et on ne remarque aucune variation significative en fonction de la température. Il n'y a donc pas d'effet d'adsorption dans la chambre de calibration.

### ***Chambres réelles***

Des essais similaires ont été effectués dans deux bureaux et dans la chambre climatique. Les résultats, résumés dans la Table 2 montrent un effet d'adsorption important, qui varie de pièce à pièce et de gaz à gaz.

*Table 2: Résultats des comparaisons dans diverses chambres.*

Chambre	Volume [m³]	Débit spécifique [h⁻¹]*)	Temp. [°C]	Concentrations relative **)		
				PMCP	PMCH	PDCH
Chambre de calibration	22.4	1.0	22	100%	100%	100%
Chambre climatique	85.4	1.0	20	80%	52%	45%
Bureau meublé	77.9	0.12	22	84%	74%	62%
Bureau vide	98.7	0.79	19	62%	55%	58%

\*) Débit d'air spécifique mesuré avec du N<sub>2</sub>O (technique de décrément ou d'émission constante)

\*\*) Concentrations mesurées , rapportée à la concentration prévue en l'absence d'adsorption.

## **3 FINANCES**

Les fonds utilisés à ce jour pour ce projet se répartissent comme indiqué dans la Table 3.

*Table 3: Etat financier du projet*

Fonds Institution	OFEN			Fonds propres			Total général
	EMPA	LESO	Total	EMPA	LESO	Total	
Montant budgeté	101'000	89'000	190'000	82'850	56'850	139'700	329'700
Travail effectué	90'300	-	90'300	75'850	23'450	99'300	189'600
Solde	10'700	89'000	99'700	7'000	33'400	40'400	140'100

Le LESO n'a pour l'instant utilisé que des fonds propres. Le détail des dépenses de l'EMPA est donné dans la Table 4

*Table 4: Répartition des dépenses de l'EMPA*

Département EMPA	175	175	134	134	Total
Collaborateur	V. Dorer	A. Weber	M. Hill	R. Gehrig	
Heures en 1999	161	414	1'198	87	1'860
Heures du 1.1. au 31.5.2000	26	53	0	5	84
Total (heures)	187	467	1'198	92	1'944
Dont sur compte de l'OFEN	50	467	988	0	1'505
Montant correspondant ( à Fr. 60.-/h)					90'300

Le solde de Fr. 140'100.- (dont 99'700.- provenant de l'OFEN) sera utilisé pour les travaux mentionnés dans la conclusion, conformément à la modification du contrat 66'760 du 26 Mai 2000.

## **4 CONCLUSIONS**

Les travaux menés à l'EMPA ont clairement montré que les traceurs utilisé s'adsorbent en partie sur les matériaux présents dans les chambres mesurées. La quantité adsorbée augmente avec le point d'ébullition et le poids moléculaire du composé, et varie d'une pièce à l'autre de manière difficilement prévisible. Comme la méthode passive utilise cette propriété d'adsorption pour échantillonner, il n'est très probablement pas possible de trouver un gaz traceur qui s'adsorbe bien dans l'échantillonneur et ne s'adsorbe pas sur les matériaux présents dans les locaux à mesurer.

Il a été donc proposé (et accepté) d'abandonner cette méthode et d'utiliser les moyens restants pour explorer trois voies:

1. Méthode de l'Aérosol, utilisant un compteur de particules par photo-ionisation
2. Recherche et évaluation de nouveaux types d'analyseurs
3. Utilisation d'enregistrements de concentration de CO<sub>2</sub> [Roulet, 2000].

Les deux premières voies ont pour but d'évaluer des méthodes de mesure de la concentration en traceur, et la troisième conduit à faciliter l'interprétation des mesures de concentration qui sont dores et déjà facile à faire.

## **5 PUBLICATIONS**

Dorer, V.; Gehrig, R.; Hill, M. and Weber, A.: Validation tests for a passive tracer gas technique.  
RoomVent 2000 Reading (UK)

Hill, M., R. Gehrig, et al.: Are Measurements of Air Change Rates with the PFT-Method Biased by  
Sink and Temperature Effects? Healthy buildings 2000, Helsinki.

Roulet, C.-A.: ATEMAC – Bibliographic study. Rapport ITB-LESO, 1997.

Roulet, C.-A.: Compagnon, R.; Cretton, P.; Foradini, F.; Hill, M.; Gehrig R.: Application des Traceurs  
Passifs pour l'Étude des Mouvements d'air et de Contaminants. - Étude Préliminaire - Rapport  
Final. LESO-PB, EPFL, 23 Mars 1998.

Roulet, C.-A.: ATEMAC –Application of Passive Tracers to Diagnosis of Air Handling Units. Draft  
report, August 1999

Roulet, C.-A., L. Deschamps, et al. [1999]. DAHU: Diagnosis of Air Handling Units. Lausanne, LESO-  
PB, EPFL.

Roulet, C.-A.: Using CO<sub>2</sub> Decay for Airflow Rate Measurements. LESO Internal note, February 2000.

Lausanne, le 27 juin 2000



Roulet Claude-Alain