



## Office fédéral de l'énergie

3003 Berne

### RAPPORT FINAL

Pour les travaux de recherche définis dans le mandat:

**Titre du projet:**

**ATEMAC – Application des Traceurs Passifs pour l'Étude des Mouvements d'Air et de Contaminants**

No OFEN 19 063

**Résumé:**

Les gaz traceurs sont utilisés en Suisse depuis plus de 15 ans pour mesurer des débits d'air et des taux de ventilation ainsi que pour simuler le mouvement de polluants. Les systèmes disponibles en Suisse sont précis et performants, mais relativement volumineux et coûteux. Ils nécessitent de plus un temps de mise en œuvre relativement important. L'objectif général du projet est de développer une méthode de mesure des débits d'air simple, efficace et peu coûteuse.

L'objectif initial était d'introduire en Suisse une méthode développée au Brookhaven National Laboratory. Des mesures effectuées à l'EMPA ont montré cependant que les traceurs utilisés s'adsorbent de manière imprévisible sur les matériaux et le mobilier, ce qui introduit une sur-estimation importante des débits d'air.

Le plan de recherche a été réorienté en 2000 pour explorer trois autres voies possibles:

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 été explorées. La méthode de l'aérosol n'a pas encore fait ses preuves. Par contre, on trouve sur le marché de plus en plus d'analyseurs à des prix abordables, est plusieurs possibilités nouvelles sont en développement, notamment dans les EPF.

La troisième voie est facilement utilisable dans de nombreux cas. Un logiciel facilitant l'interprétation des mesures de concentration a été développée et validé. De plus, l'interprétation des résultats fournit une estimation de la perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment.

**Durée du projet:**

1.1.1998      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

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

**Email:** [claude.roulet@epfl.ch](mailto:claude.roulet@epfl.ch)      **Web:** [lesowww.epfl.ch](http://lesowww.epfl.ch)

# 1 Introduction

Avec l'amélioration de l'isolation thermique, la quantité d'énergie nécessaire à l'aération des bâtiments devient relativement de plus en plus importante. Une meilleure connaissance des débits d'air effectifs permet d'assurer une ventilation suffisante sans gaspillage.

D'autre part, il faut que l'enveloppe du bâtiment soit raisonnablement étanche pour assurer une ventilation contrôlée. Les exigences de la nouvelle norme SIA 180 ont été renforcée dans ce sens, et une méthode simple permettant de vérifier, du moins approximativement, l'étanchéité de l'enveloppe devient nécessaire.

Les systèmes disponibles mesurant les débits d'air à l'aide de gaz traceurs ou l'étanchéité de l'enveloppe par pressurisation sont précis et performants, mais relativement volumineux et coûteux. Il est notamment exclu d'effectuer des centaines de mesures, donc d'obtenir par exemple des informations statistiques sur l'état actuel des bâtiments, à un prix raisonnable.

Les mesures préliminaires effectuées dans une phase d'avant projet [1] ayant été jugées intéressantes, le contrat 19063 a été signé pour développer l'usage des traceurs perfluorés (méthode PFT) [1], qui permettent une injection par diffusion avec de petites sources autonomes et une détection en très faible concentration par accumulation dans des capteurs passifs.

## 2 Objectifs du projet

L'objectif initial était donc d'introduire en Suisse la méthode développée au [Brookhaven National Laboratory](#), qui consiste à utiliser des gaz traceurs organiques perfluorés. Les études faites dans le cadre de ce contrat ont malheureusement montré que cette méthode, pourtant utilisée dans d'autres pays, est en fait inutilisable [2], [3]. Une partie importante, variable et imprévisible du gaz traceur est adsorbée par les matériaux présents dans les locaux mesurés, 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 ou plusieurs méthodes de mesure simples, bon marché et efficaces des débits d'air dans les bâtiments.

Trois voies ont été explorées depuis le 26 mai 2000

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>.

L'objectif révisé est donc de déterminer si l'une ou plusieurs de ces possibilités est utilisable et, si oui, de l'amener autant que possible vers une application pratique.

## 3 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 diminue en rapport à la quantité d'air dans laquelle le gaz se sera dilué, donc avec le débit d'air neuf. Ce débit est obtenu en interprétant l'évolution dans le temps de la concentration de gaz traceur.

**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. Ils sont diffusés dans la pièce en les laissant s'évaporer au travers d'un septum fermant le flacon contenant le composé.

<sup>1</sup> Rapport Annuel à l'OFEN – Étude préliminaire – Rapport à l'OFEN, LESO-EPFL, 1997

<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.

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.

Ces méthodes sont décrites en détail dans [4].

## 4 Travaux effectués et résultats

### 4.1 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 [5].

#### 4.1.1 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 [6].

#### 4.1.2 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 échantilleurs 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 échantilleurs 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.

### 4.2 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 [5].

### 4.3 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 [7] s'appliquerait sans autre aux traceurs perfluorés.

Dans le cadre du projet européen AIRLESS, le transfert de composés organiques volatils du canal d'extraction au canal de pulsion dans des installations de ventilation munies d'échangeurs de chaleur rotatifs a été mesuré [8]. Ces mesures ont permis de vérifier que des composés organiques volatils à bas point de fusion (donc non adsorbés), en conjonction avec un analyseur à ionisation de flamme (FID) pouvaient être utilisés pour la mesure de débits.

#### 4.4 Sources et échantilleurs de gaz traceurs

Les méthodes passives existantes utilisent des sources de divers types, qui présentent toutes des avantages et des inconvénients. Parmi ces derniers citons:

- La variation du débit avec la température
- L'hystéresis résultant du temps de diffusion du traceur au travers du couvercle ou septum
- Un débit fixe, souvent mal adapté aux mesures dans les petits ou grands espaces

C'est pourquoi de nouvelles sources de gaz traceur passives ont été développées. Des 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 restreints.

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 [7].

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 a été examiné. 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. Les essais effectués montrent toutefois une mauvaise résolution dans la colonne de chromatographie utilisée pour les autres traceurs.

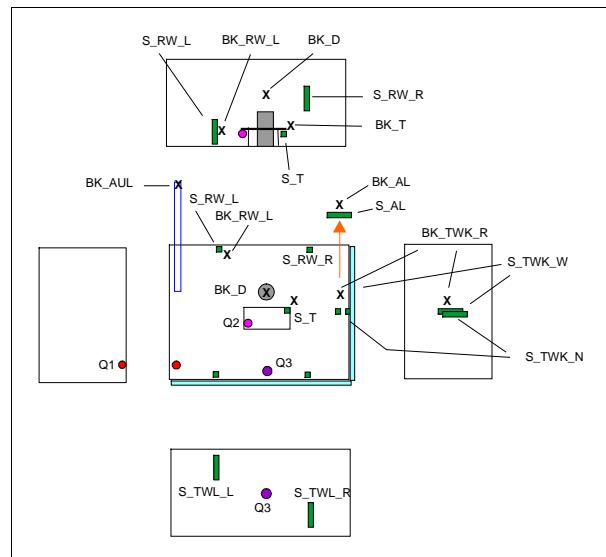
#### 4.5 Validation de la méthode

##### 4.5.1 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, pour permettre d'évaluer la méthode dans plusieurs configurations possibles. Le Tableau 1 donne les caractéristiques de ce plan.

Tableau 1: Plan d'expérience pour la validation de la méthode

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 était 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.

#### 4.5.2 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 calibrage

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 échantilleurs 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.

Tableau 2: Concentrations mesurées dans la chambre de calibrage, 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 calibrage.

#### Chambres réelles

Des essais similaires ont été effectués dans deux bureaux et dans la chambre climatique. Les résultats, résumés dans la Tableau 3 montrent un effet d'adsorption important, qui varie de pièce à pièce et de gaz à gaz.

Tableau 3: 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.

## 4.6 Méthode de l'Aérosol

Le Prof. B. Keller et ses collaborateurs à l'[Institut für Hochbautechnik de l'ETH Zürich](#) ont développé la méthode dite "PAH"<sup>3</sup> pour mesurer les débits d'air extérieur dans les bâtiments. Cette méthode a l'avantage de nécessiter une instrumentation simple: Un analyseur par photo-ionisation [9] mesure la concentration en particules de suie générées par le trafic automobile. Cette concentration varie avec le temps, et les variations à l'intérieur du bâtiment, résultat de l'infiltration d'air, sont en retard par rapport aux variations à l'extérieur. Une analyse en composantes spectrales des variations de concentration dans l'air intérieur et extérieur devrait permettre, sous certaines conditions, de mesurer le débit d'air d'infiltration [10].

La méthode a été testée dans le même bureau que celui utilisé pour tester la méthode PFT. Un taux de renouvellement d'air extérieur de 1 par heure a été imposé par un petit ventilateur électrique installé dans une fenêtre. L'air ainsi introduit induit une exfiltration de l'air vicié par le pas de la porte du bureau. La concentration en suie a été mesurée et enregistrée toutes les 10 secondes à l'intérieur et à l'extérieur, à l'aide de deux appareils à photo-ionisation. Un gaz traceur classique était injecté simultanément, à débit constant, dans le flux d'air frais près du ventilateur.

La mesure par gaz traceur permet de vérifier le débit d'air extérieur injecté dans le bureau. Une analyse en composante spectrale des enregistrements des deux appareils à photo-ionisation a été effectuée, à l'aide d'un logiciel développé par l'[Institut für Hochbautechnik](#).

Les débits d'air ainsi obtenus ne correspondent pas au débit mesuré par gaz traceur. Suivant la période de temps interprétée et la bande spectrale utilisée, les débits d'air obtenus étaient entre 2 et 30 fois supérieurs au débit réel. Le logiciel d'interprétation a alors été vérifié, et une erreur fondamentale, qui ne peut pas être corrigée par des moyens mathématiques simples, a été détectée. Toutefois, un mélange total de l'air du bureau, par exemple à l'aide d'un second ventilateur, devrait permettre de simplifier notablement le problème. Un essai supplémentaire était prévu en hiver 2000-2001, mais n'a pas été effectué, l'erreur dans le logiciel d'interprétation n'ayant pas été corrigée. D'autre part, cette méthode semble nécessiter un mélange parfait et rapide de l'air dans la chambre mesurée, ce qui complique notablement la procédure.

## 4.7 Nouveaux types d'analyseurs

Une méthode de diagnostic simple et bon marché doit disposer d'analyseurs de gaz traceur légers, portables, et bon marché.

On trouve sur le marché des analyseurs simples, pratiques (ils enregistrent les concentrations en fonction du temps) et à un prix abordable. De nouveaux analyseurs portables apparaissent chaque année, ils sont de plus en plus portables et leur prix baisse d'année en année. Citons notamment l'analyseur à photoionisation [Dräger Multi-PID](#) l'analyseur de N<sub>2</sub>O Dräger Polytron IR-N<sub>2</sub>O et les analyseurs de CO<sub>2</sub> [Anagas CD 98](#), [PGA-1](#), [BIRAL Q-Trak](#), [Aritron](#), etc. Une [liste plus complète](#) des [fabricants d'analyseurs](#) et autres accessoires pour l'analyse de l'air se trouve sur la Toile<sup>4</sup>.

Les capteurs à oxydes métalliques actuels sont petits, légers, suffisamment stables et précis pour permettre de mesurer la concentration de divers composés chimiques oxydables. Leur temps de réaction est de l'ordre de la minute. Ils sont très bon marché si on les compare d'autres analyseurs. La Tableau 4 donne la sensibilité de quelques uns de ces détecteurs.

Tableau 4: Sensibilité de quelques détecteurs utilisables pour les techniques de gaz traceurs ([Capteur Sensors & Analysers Ltd](#)).

Gaz	Gamme
<u>Butane</u>	0 - 1%
<u>Ethanol</u>	0 - 1000ppm
<u>Ethylene</u>	0 - 1000ppm
<u>Heptane</u>	0 - 1000ppm
<u>Hexane</u>	0 - 1000ppm
<u>Iso Propyl Alcohol</u>	0 - 200ppm
<u>Toluene</u>	0 - 500ppm
<u>VOCs</u>	0 - 10ppm

Ils ont l'inconvénient d'être peu sélectifs, sensibles à l'humidité et de sensibilité variable. Ils présentent une dérive qui nécessite un ré-étalonnage fréquent.. La présence de vapeurs organiques autres que le

3 Polycyclic aromatic hydrocarbons

4 Par exemple [http://directory.google.com/Top/Science/Environment/Environmental\\_Monitoring/Products\\_for\\_Sampling\\_and\\_Monitoring/Air/](http://directory.google.com/Top/Science/Environment/Environmental_Monitoring/Products_for_Sampling_and_Monitoring/Air/)

gaz traceur utilisé peut perturber la mesure en modifiant la sensibilité. Toutefois, la concentration en VOC dans les bâtiments dépasse rarement  $2 \text{ mg/m}^3$  [11], soit 2 ppm si on admet une densité de  $1 \text{ kg/m}^3$ , et moins pour les molécules plus lourdes. Ces capteurs sont utilisés pour régler des installations de ventilation (ventilation à la demande), mais leur usage pour la mesure de débits par gaz traceurs reste à vérifier.

Des capteurs à film mince, formé d'une couche de polymère sur une micro-tranche de silicium sont en développement dans divers laboratoires (par ex. [Prof. Baltes, ETHZ](#)) [12]. Les molécules de gaz diffusent dans la couche organique et en changent la constante diélectrique, qui est mesurée par le micro-circuit sous-jacent. Le choix du polymère permet de rendre ces capteurs sélectifs à un gaz organique donné.

Un micro-spectromètre infrarouge intégré à une puce de silicium a été développée à l'EPFL. Une telle puce devrait permettre de construire des spectromètres sensibles à plusieurs gaz, à très bas prix [13] ([G. Lammel and S. Schweizer EPFL](#)).

## 4.8 Gaz carbonique

Le gaz carbonique est naturellement présent dans l'air extérieur, à une concentration de base de 360 ppm en campagne. Dans les villes, cette concentration est plus élevée et peut atteindre 600 ppm. A l'intérieur, les habitants, les animaux et les gazinières produisent du CO<sub>2</sub>, ce qui augmente la concentration. Dans les bâtiments correctement aérés, cette concentration ne devrait toutefois pas dépasser 2000 ppm. Des personnes sensibles peuvent avoir des maux de tête à partir de 5000 ppm.

La méthode consiste à interpréter l'évolution de la concentration en gaz traceurs à l'intérieur d'une pièce, en utilisant en principe le CO<sub>2</sub> naturellement présent. Toutefois, si cette concentration est insuffisante pour une mesure précise, il est possible d'en injecter à partir d'une bouteille.

Si le débit de la source est connu, le débit d'air d'infiltration peut être calculé à partir de l'enregistrement de la concentration en gaz carbonique [4]. Les valeurs maximales de cette concentration pendant la période d'occupation donnent une idée du débit d'air minimum par personne. La méthode la plus simple consiste néanmoins à utiliser les périodes pendant lesquelles il n'y a aucune source de CO<sub>2</sub> dans le volume étudié. L'analyse de la décroissance de la concentration que l'on observe après le départ des occupants permet d'obtenir la constante de temps nominale et le débit d'air spécifique (ou taux de renouvellement d'air) de la pièce ou de la zone ventilée par l'installation de ventilation. Si le débit d'air extérieur est constant, la concentration de CO<sub>2</sub> décroît exponentiellement avec une constante de temps égale à la constante de temps nominale du volume étudié.

Suivant que l'installation de ventilation fonctionne ou non, on obtient soit la constante de temps nominale globale, soit celle relative à l'infiltration seulement. Cette méthode, combinée avec une simple mesure de pression différentielle, permet de contrôler l'étanchéité des enveloppes de bâtiments. Un logiciel convivial a été développé, qui facilite l'interprétation des enregistrements.

Des expériences ont été faites qui montrent la faisabilité de cette méthode. La Figure 1 montre l'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub>, enregistrée dans un bureau. Cet enregistrement montre plusieurs périodes de décroissance, en particulier pendant les nuits.

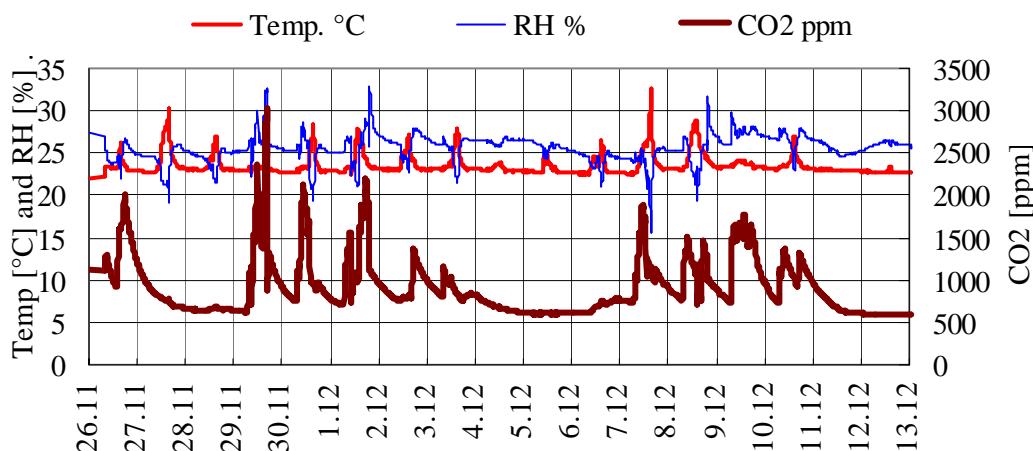


Figure 1: Enregistrement de la concentration en CO<sub>2</sub> dans un bureau en Novembre.

Une dizaine de ces périodes de décroissance a été interprétée pour en déduire le débit d'air spécifique ou taux de renouvellement d'air (Figure 2).

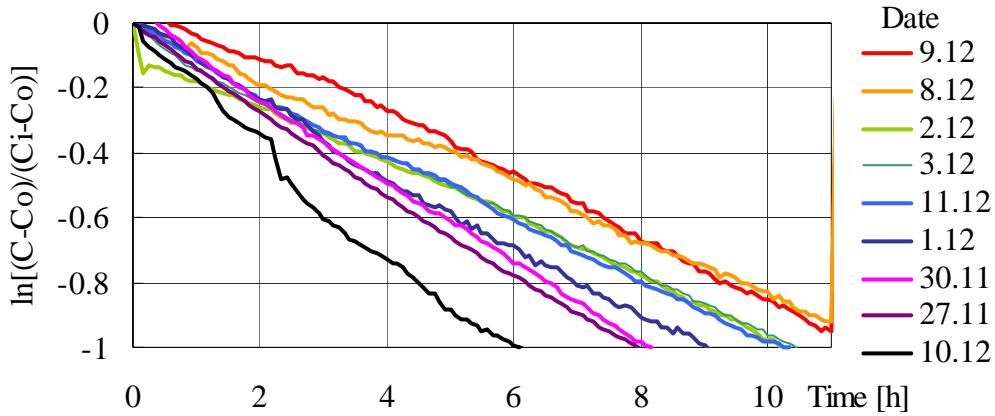


Figure 2: Représentation des décroissances de concentration sélectionnées, sur un diagramme semi-logarithmique.

Les résultats obtenus et donnés dans le Tableau 5 varient entre  $0,083 \pm 0,001$  et  $0,146 \pm 0,003 \text{ h}^{-1}$ . La valeur moyenne est de  $0,100 \pm 0,005 \text{ h}^{-1}$ . Les variations entre les différentes périodes de mesure proviennent notamment des variations des conditions climatiques.

Le volume de la pièce étant de  $52\text{m}^3$ , le débit d'air extérieur, entrant par la façade et par la porte, est donc de  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  environ, ce qui, divisé par l'air de la façade donne un débit d'air spécifique de  $0,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Le bureau est situé au deuxième étage de l'immeuble, et est régulièrement soumis à une différence de pression de plusieurs pascals. Ce résultat permet donc de qualifier la façade d'étanche.

Tableau 5 : Débits d'air spécifiques (en  $\text{h}^{-1}$ ) obtenus à partir de la Figure 1

Du	à	au	à	Débit d'air spécifique	
26.11	18:32	27.11	23:32	0.101	$\pm 0.002$
29.11	17:42	30.11	6:52	0.123	$\pm 0.001$
30.11	18:52	1.12	6:32	0.105	$\pm 0.003$
1.12	19:22	2.12	11:37	0.086	$\pm 0.002$
2.12	17:57	3.12	7:32	0.089	$\pm 0.001$
7.12	18:02	8.12	5:07	0.083	$\pm 0.001$
8.12	19:42	9.12	6:47	0.092	$\pm 0.002$
9.12	17:37	10.12	6:32	0.146	$\pm 0.003$
10.12	17:42	11.12	12:17	0.110	$\pm 0.003$

## 4.9 Logiciel TGD

Un logiciel convivial a été développer pour faciliter l'interprétation des enregistrements de concentration de gaz traceurs lors d'expériences de décroissance (TGD sont les initiales de Tracer Gas Decay).

Ce logiciel permet:

- d'importer des fichiers de mesures de la concentration en fonction du temps
- de tracer le diagramme de concentration en fonction du temps
- de permettre à l'utilisateur de choisir facilement les périodes de décroissance intéressantes
- de calculer la constante de temps nominale et le débit d'air spécifique (taux de renouvellement d'air) pour chaque période sélectionnée
- de déterminer l'incertitude dont ces résultat sont entachés
- d'en calculer la moyenne et l'incertitude globale
- de montrer et d'imprimer un rapport.

La Figure 3SEQARABISCH montre l'enregistrement correspondant à une autre expérience dans un bureau voisin de celui de la première, tel qu'il est donné par le logiciel TGD. Les rectangles sont tracés à l'aide de la souris pour sélectionner les zones à interpréter.

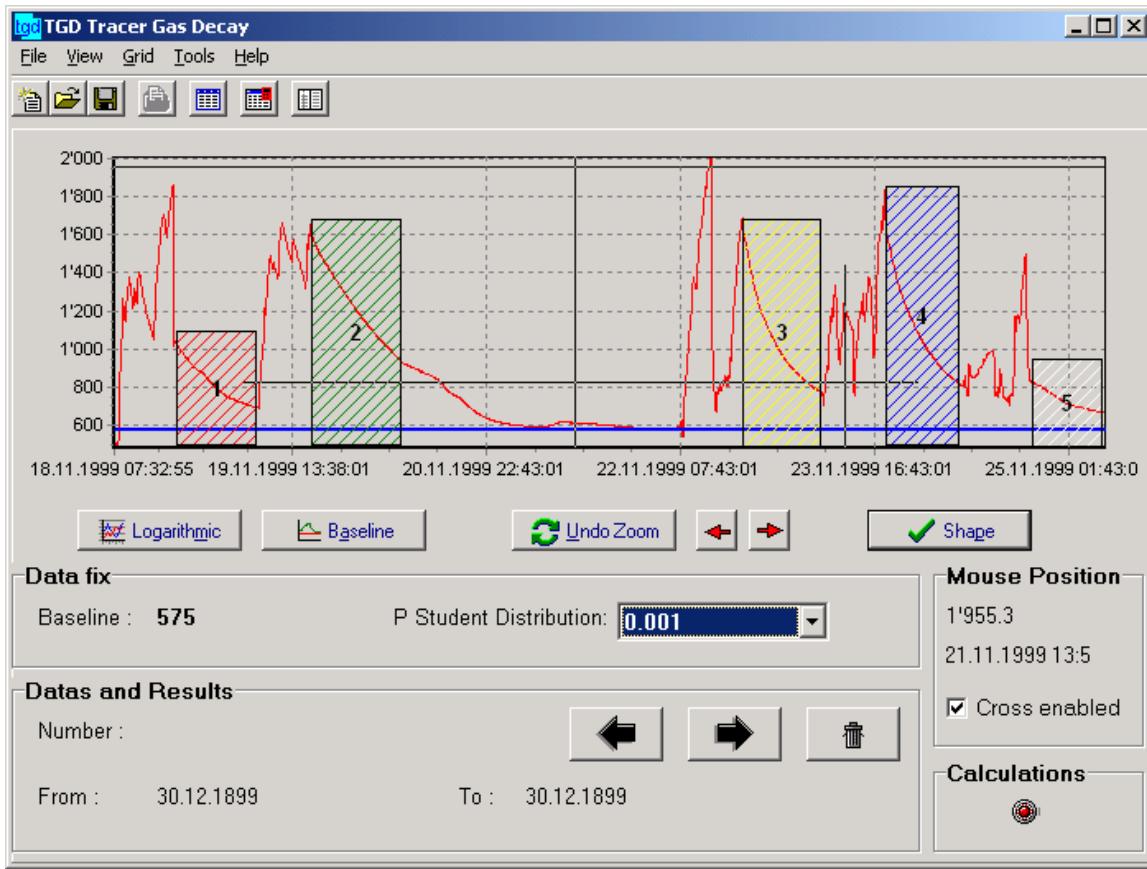


Figure 3: Écran des données du logiciel TGD, montrant notamment un enregistrement de la concentration en gaz carbonique dans un autre bureau du LESO..

Le logiciel calcule la constante de temps nominale et le débit d'air spécifique (taux de renouvellement d'air) pour chaque période sélectionnée. Le SEQARABISCHTableau 6 montre les résultats des interprétations.

SEQARABISCHTableau 6: Débits d'air spécifiques (en  $\text{h}^{-1}$ ) obtenus à partir de la SEQARABISCH avec le logiciel TGD.

De	à	$n_L$	$\delta n_L$
18.11.99 18:10:46	19.11.99 07:53:17	0.102	$\pm 0.001$
19.11.99 17:07:13	20.11.99 08:30:26	0.067	$\pm 0.000$
22.11.99 18:26:29	23.11.99 07:58:04	0.122	$\pm 0.001$
23.11.99 18:45:29	24.11.99 07:20:51	0.116	$\pm 0.001$
24.11.99 19:39:26	25.11.99 07:41:13	0.088	$\pm 0.001$

Le débit d'air spécifique moyen est de nouveau de  $0.100 \pm 0.002 \text{ h}^{-1}$ , mais l'écart type des cinq mesures est de  $0.020 \text{ h}^{-1}$ .

#### 4.10 Validation

D. Bloomfiel (BRE, UK) a justement déclaré en 1990 que la validation d'une méthode ou d'un programme "est impossible, n'a aucun sens, mais est primordiale". L'expérience décrite ci-dessous n'a donc pas pour objectif de valider la méthode, mais de montrer qu'elle donne des résultats compatibles avec ceux de méthodes éprouvées, telles que la dilution d'un gaz traceur comme l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ).

Ce gaz traceur a été injecté le soir, à la fin des cours, dans un auditoire muni d'une installation de conditionnement d'air indépendante. Les concentrations de ce gaz et de gaz carbonique ont été enregistrées avec un analyseur photo-acoustique Brüel & Kjaer.

Les enregistrements illustrés dans la Figure 5 montrent trois périodes: d'abord une forte décroissance pendant la première heure, lorsque le système d'air conditionné est en fonction. Ensuite, l'installation est déclenchée pour la nuit, et la décroissance de la concentration ne résulte que de l'infiltration. Enfin, l'arrivée des étudiants le matin suivant fait augmenter la concentration en gaz carbonique alors que celle de  $\text{SF}_6$  décroît toujours. Pendant toute la nuit, les concentrations normalisées des deux gaz traceurs sont très proches l'une de l'autre.

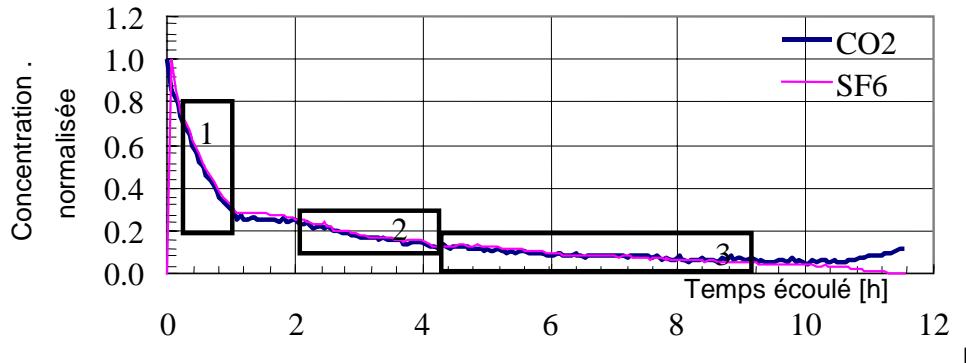


Figure 5: Enregistrement des concentrations de  $SF_6$  et de  $CO_2$  dans un auditoire après un cours. Les rectangles marquent les parties utilisées pour les comparaisons..

Les résultats de l'interprétation de ces enregistrements sont en bon accord (Tableau 7), sauf pour la période 3, lorsque les concentrations sont proches du bruit de fond.

Tableau 7: Comparaison des débits d'air spécifiques obtenus par dilution de  $CO_2$  et de  $SF_6$

No	Débits d'air spécifiques	
	$SF_6$	$CO_2$
1	$1.157 \pm 0.009$	$1.177 \pm 0.017$
2	$0.300 \pm 0.008$	$0.290 \pm 0.007$
3	$0.234 \pm 0.003$	$0.162 \pm 0.006$

#### 4.11 Test d'étanchéité

Le volume de la pièce étant de  $52\text{m}^3$ , le débit d'air extérieur, entrant par la façade et par la porte, est donc de  $5,2 \text{ m}^3/\text{h}$  environ, ce qui, divisé par l'air de la façade ( $9 \text{ m}^2$ ) donne un débit d'air surfacique de  $0,51 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Le bureau est situé au deuxième étage de l'immeuble, et est régulièrement soumis à une différence de pression de plusieurs pascals. Ce résultat permet donc de qualifier la façade d'étanche, selon les exigences de la norme SIA 180 [14].

### 5 Collaborations

Les travaux dans le cadre de ce projet sont effectués en collaboration entre l'[EMPA](#), Abt. 175 Energie-systeme/Haustechnik, (expériences avec la méthode PAH), l'[ETHZ](#), Institut für Hochbautechnik, (développement et interprétation pour la méthode PAH) et l'[EPFL](#), [LESO.-PB](#) (coordination, méthode du  $CO_2$ , recherche d'analyseurs, logiciels).

Le logiciel TGD a été développé en sous-traitance par le bureau [E4Tech, Lausanne](#)

Les mesures de validation ont été faites en collaboration avec le [department of Building](#) de la [National University of Singapore](#).

### 6 Transfert de connaissances

Les résultats relatifs à la méthode PFT, à savoir le problème d'adsorption des gaz traceurs peu volatils utilisés, ont été présentés dans deux conférences internationales [2, 3].

Le logiciel correspondant à la méthode du  $CO_2$  est disponible auprès du LESO ([claude.roulet@epfl.ch](mailto:claude.roulet@epfl.ch)) et de E4Tech ([foradini@e4tech.com](mailto:foradini@e4tech.com))

La méthode du  $CO_2$  et les mesures de validation correspondantes sont présentées à la conférence CISBAT 2001 [15]

### 7 Perspectives

Au moins une méthode d'emploi facile est commercialement disponible, et pourrait être utilisée à large échelle par les bureaux d'ingénieurs.

## 8 Bibliographie et Publications

1. Dietz, R.N., R.W. Goodrich, and E.A. Cote, *Brookhaven Air Infiltration Measurement System (BNL/AIMS). Description and Application.* 1983, Brook-haven National Laboratory, BNL 33846: Upton, New York, USA. p. 17p.
2. Dorer, V., et al. *Validation tests for a passive tracer gas technique.* in *Air Distribution in Rooms - RoomVent 2000.* 2000. Reading (UK): Elsevier.
3. Gehrig, R., et al. *Are measurements of air change rates with the PFT-method biassed by sink effects?* in *Healthy Building.* 2000. Helsinki.
4. Roulet, C.-A. and L.Vandaele, *Airflow patterns within buildings - measurement techniques.* AIVC technical note. Vol. 34. 1991, Bracknell, Berkshire RG124AH, GB: AIVC. 265.
5. Roulet, C.-A., et al., *Application des Traceurs Passifs pour l'Étude des Mouvements d'air et de Contaminants. - Étude Préliminaire - Rapport Final..* 1998, LESO-PB, EPFL.
6. Roulet, C.-A., *ATEMAC - Bibliographic study..* 1997, LESO - EPFL: Lausanne.
7. Roulet, C.-A., F. Foradini, and L. Deschamps. *Measurement of Air Flow Rates and Ventilation Efficiency in Air Handling Units.* in *Indoor Air'99.* 1999. Edinburgh.
8. Roulet, C.-A., M.-C. Pibiri, and R. Knutti. *Measurement of VOC Transfer In Rotating Heat Ex-changers.* in *Healthy Buildings 2000.* 2000. Helsinki: SIY Indoor Air Information Oy, Vantaa, Finland.
9. Siegmann, K. and H.-C. Siegmann, *The formation of carbon in combustion and how to quantify the impact on human health.* Europhysics News, 1997. **28**(2): p. 50-57.
10. Wilhelm, O. and al. *Traffic born Aerosols as a Tracer Gas for the Determination of External Air Ex-change Rates.* in *10. Internat. Symposium für Bauphysik.* 1999. Dresden.
11. Bluyssen, P.M., et al. *European Audit Study in 56 Office Buildings: Conclusions and Recommendations.* in *Healthy Buildings '95.* 1995. Milano.
12. Koll, A., et al., *Discrimination of volatile organic compounds using CMOS capacitive chemical microsensors with thickness adjusted polymer coating.* Proc. SPIE, 1999. **3673**: p. 308-317.
13. Lammel, G., S. Schweizer, and P. Renaud. *MEMS Infrared Gas Spectrometer based on a Porous Silicon Tunable Filter.* in *IEEE International MEMS Conference.* 2001. Interlaken.
14. SIA 180: *Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments.* 1999, SIA: Zurich.
15. Roulet, C.-A. and F. Foradini. *Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO<sub>2</sub> Concentration Decays.* in *CISBAT 2001.* 2001. Lausanne: EPFL.