

# EXPÉRIMENTATION IN SITU EN RELATION AVEC LES QUALITÉS THERMIQUES ET AÉRAULIQUES DU BÂTIMENT

C.-A. Roulet,  
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
CH 1015 Lausanne  
Suisse

## Résumé

Diverses méthodes de mesurage peuvent être utilisées dans un bâtiment existant afin d'aider à résoudre différents problèmes, que ce soit lors de la mise en service du bâtiment, suite à des plaintes ou à des dégâts ou avant d'entreprendre des travaux de réfection importants. Si les problèmes sont bien identifiés et si les méthodes de mesurage sont correctement choisies, leur mise en oeuvre permet de gagner un temps et des investissements précieux.

Cette contribution présente une revue des méthodes les plus importantes applicables au bâtiment, sans toutefois traiter des mesures classiques telles que la mesure de la température ou de l'humidité de l'air. L'indice et la signature énergétique, des méthodes de mesure du coefficient de transmission thermique et de la perméabilité à l'air de l'enveloppe et l'utilisation de gaz traceurs pour l'étude des problèmes liés à la qualité de l'air intérieur sont présentées.

La fin de l'article est consacré à un aspect nouveau des techniques de mesurage, dû à l'apparition des mini-ordinateurs. Ceux-ci autorisent l'utilisation de méthodes évoluées de planification et d'interprétation des expériences qui peuvent permettre d'abaisser le coût des mesures et qui, à partir de données mesurées brutes, aboutissent à des résultats plus précis qu'avec les méthodes usuelles.

## ON SITE MEASUREMENTS RELATED TO INDOOR AIR QUALITY AND THERMAL PROPERTIES OF BUILDINGS

### Abstract

Various measurement techniques can be used in a buildings and cand be of significant help in solving problems, either when commissioning the building or a part of it, or after complaints or hazards, or before planning an important retrofit. Lot of time and money may be saved by applying properly chosen measurement techniques when the problems are well identified and measurement techniques correctly choosen.

This contribution presents the most important methods applied to buildings, but without spending time on classical techniques such as air temperature or humidity measurement techniques. In particular, energy index, energetic signature, methods to measure the thermal transmission or the air permeability of the building envelope, as well as the use of tracer gases for the study of problems linked with indoor air quality are presented.

The end of the paper adresses a new aspect of the measurement techniques, linked with the outbreak of personal computers. These allows one to use sophisticated experimental planning and interpretation methods, which can lower the measurement cost and provide more accurate results than classical methods when starting from the same measured data.

## Introduction

A l'heure actuelle, il faut reconnaître qu'il est rare que le maître de l'ouvrage, l'architecte ou un maître d'oeuvre effectue des mesures autres que des métrés avant une réfection ou lors de la remise d'un bâtiment. De même, il est rare que l'utilisateur contrôle le bon fonctionnement de son bâtiment autrement que par des mesures ponctuelles de température. Or, les résultats de mesures convenablement choisies peuvent aider à éviter ou à résoudre de nombreux problèmes qui se rencontrent dans le bâtiment. Le propos de cet article est donc de présenter quelques méthodes de mesurages.

## Procédure préalable

Toutefois, pour être efficace, il est essentiel en premier lieu d'identifier le problème à résoudre. Ensuite, et ensuite seulement, on pourra choisir les paramètres du problème qu'il est important de mieux connaître et, enfin, déterminer la méthode de mesurage propre à améliorer la connaissance de ces paramètres. En d'autres termes:

### La mesure donne la réponse, mais quelle est la question?

Préciser le problème à résoudre **avant** de planifier et d'effectuer des mesures est essentiel. De nombreuses campagnes de mesures ont donné des résultats inutilisables (ou très partiellement utilisables) parce qu'effectuées sans but précis. Avant d'effectuer toute mesure, on devrait répondre aux questions suivantes:

- 1) Quel est mon problème, quels sont mes objectifs?
- 2) Quelles informations (données, renseignements) manque-t-il pour le résoudre?
- 3) Comment obtenir ces informations? Une mesure est-elle nécessaire pour les obtenir? Si oui, quelle méthode de mesure utiliser?
- 4) Comment interpréter les résultats bruts pour obtenir les informations souhaitées?
- 5) Quelles seront les meilleures conditions pour opérer ces mesures, et à quels endroits effectuer ces mesures?
- 6) Quels sont les instruments de mesure les plus appropriés?

Ensuite, et ensuite seulement, on pourra installer ces instruments, effectuer la mesure et interpréter les résultats de la mesure.

Cette démarche préalable peut sembler longue et fastidieuse, mais elle est la condition indispensable au succès de la mesure, donc à la résolution du problème posé. Ceci étant, examinons quelques-unes de ces méthodes.

## Quelques méthodes de mesurage utiles au diagnostic énergétique et aérodynamique

Même si on se limite aux questions liées aux flux d'air ou d'énergie dans le bâtiment, les méthodes propres à obtenir des informations au travers de mesures sont très nombreuses. Plusieurs ouvrages sont consacrés à leur description, dont quelques-uns sont cités à la fin de cet article [1 à 5]. Nous nous bornerons ici à présenter quelques-méthodes, choisies soit pour leur intérêt général, soit parce qu'elles ont été l'objet de récents développements.

## Indices de consommation d'énergie

Il n'est pas de gestion sans comptabilité, donc pas de gestion énergétique sans comptabilité énergétique. La mesure de la consommation d'agents énergétiques et le calcul d'indices de consommation permet de répondre à la question: **ma consommation d'énergie est-elle normale ou exceptionnelle?** La donnée de base pour répondre à cette question est évidemment la consommation d'agents énergétiques d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments pendant un intervalle de temps donné. Pour déterminer cette consommation, il faut au préalable préciser quelques points.

- Quelles sont les limites de l'étude, à savoir les frontières du ou des bâtiments

étudiés? Pour faciliter l'étude, il y a intérêt à placer ces limites là où il y a des compteurs. Par exemple, si plusieurs bâtiments sont chauffés par une seule chaudière, il sera plus simple de les étudier globalement.

- Quel sont les agents énergétiques que l'on désire examiner: combustibles gazeux, liquides et solides, électricité, chaleur? Dans les climats froids et tempérés, les agents utilisés pour le chauffage prédominent, mais les autres agents contribuent aussi au chauffage. Il est donc plus correct de les mesurer tous.
- Quelle est la période de mesure? En règle générale, on détermine la consommation annuelle. On peut toutefois séparer la saison de chauffage du reste de l'année.

Afin de permettre la comparaison entre agents énergétique, il convient d'exprimer toutes les consommation dans une unité physique commune, par exemple le mégajoule [MJ] ou le kilowatt-heure [kWh] à l'aide d'une table des pouvoirs calorifiques. La consommation totale d'agents énergétique peut alors être rapportée à une grandeur caractéristique de la dimension du bâtiment, par exemple son volume ou sa surface brute (mur inclus) de plancher chauffé. Cette dernière grandeur, facile à mesurer sur plan ou in situ, est la plus souvent adoptée. Appelons indice de dépense d'énergie la grandeur définie par:

$$IDE = \frac{\text{Consommation annuelle d'agents énergétique [MJ]}}{\text{Surface brute de plancher chauffé [m}^2\text{]}}$$

Cet indice peut alors être comparé à d'autres, par exemple situé parmi une population statistiquement représentative des bâtiments d'un pays, d'une catégorie, ou d'une zone climatique (Figure 1).

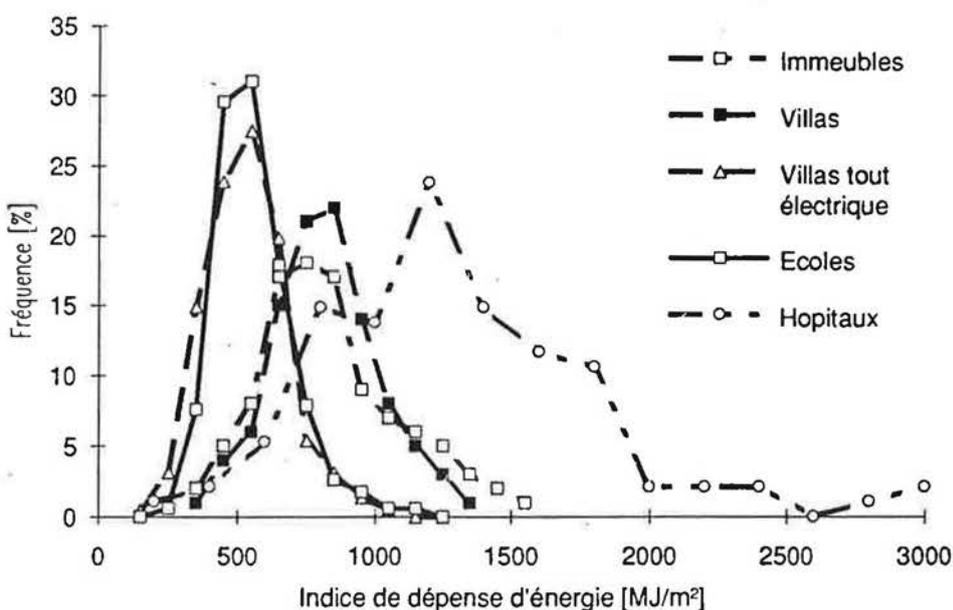


Figure 1: Distribution des indice de dépense d'énergie de bâtiments suisses.

Si l'indice calculé se situe dans le tiers inférieur de la population, il sera difficile (quoique toujours possible) de diminuer la consommation d'énergie. S'il se situe dans la moyenne, il est possible de diminuer, de manière économiquement rentable, la consommation d'énergie, et une étude des possibilités d'amélioration est recommandée. Enfin, un indice situé dans le tiers supérieur est signe de consommation d'énergie sans relation avec des prestations réelles. Des économies tant financières qu'énergétiques sont possibles et l'étude des améliorations possibles doit être effectuées d'urgence.

La consommation d'énergie peut être rapportée à d'autres grandeurs. Par exemple, la puissance moyenne, obtenue en divisant la consommation par la durée de la période de mesure, peut être comparée à la puissance installée et donner une indication sur l'adéquation de cette puissance aux besoins. En particulier, une puissance installée très supérieure à la puissance moyenne est signe de sur-dimensionnement, qui

peut résulter en une baisse de rendement.

### Signature énergétique

Pour suivre les performances d'une installation de chauffage, c'est à dire répondre à la question: **est-ce que mon installation de chauffage fonctionne correctement?**, des mesures plus fréquentes et une analyse un peu plus fine sont nécessaires. La signature énergétique consiste à relier la puissance moyenne de chauffage à la température extérieure. En effet, sur une période de temps suffisamment grande, la puissance moyenne nécessaire au chauffage d'un bâtiment,  $P$ , peut être modélisée en première approximation par:

$$P = \frac{H(\theta_i - \theta_e) - \eta_u (G_i + G_s)}{\eta_c} \quad (2)$$

où:

- $H$  est le coefficient de déperdition du bâtiment, par transmission et ventilation [W/K],
- $\theta_i$  et  $\theta_e$  sont les températures moyennes à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment [°C],
- $G_i$  et  $G_s$  les puissances moyennes des gains internes et solaires [W],
- $\eta_u$  le facteur d'utilisation de ces gains,
- $\eta_c$  le rendement moyen de chauffage.

Tant que les gains restent relativement faibles par rapport aux pertes par transmission et ventilation, la grandeur présentant la plus forte influence est la température extérieure.

Pour établir la signature énergétique, il faut relever régulièrement la consommation et la température extérieure moyennes. L'intervalle de mesure recommandé est la semaine, mais, si l'on installe un système d'acquisition automatique, il est possible d'effectuer des relevés horaires. La mesure de la consommation d'agents énergétiques nécessite un compteur. En effet, il est possible de mesurer la consommation annuelle d'huile de chauffage en sondant la citerne et en relevant les livraisons, mais cette technique est inutilisable à l'échelle de la semaine. La température extérieure moyenne est souvent affichée par les instruments de contrôle des chaufferies modernes. Si ce n'est pas le cas, il existe des acqui-seurs de données simples et bon marché qui peuvent accomplir cette tâche. Enfin, les températures hebdomadaires moyennes sont parfois publiées dans la presse.

Le diagramme reportant les points correspondant à chaque couple de mesure (puissance et température externe moyennes) est représenté à la figure 2.

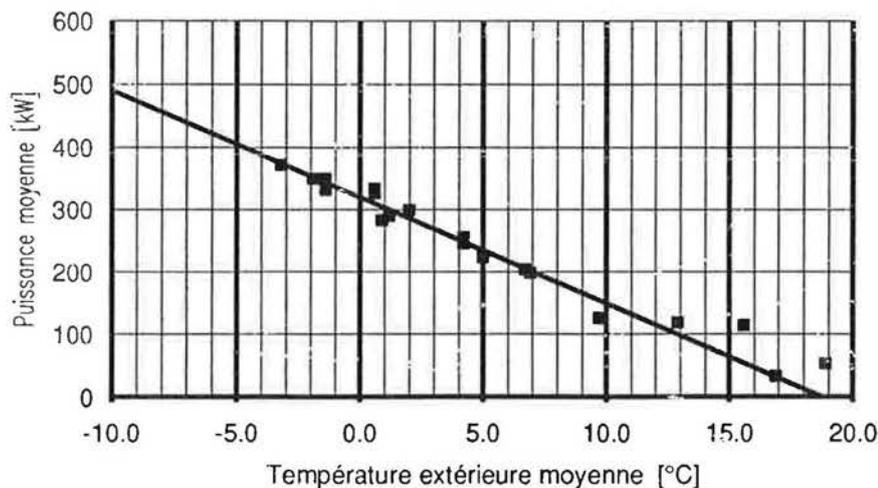


Figure 2: Signature énergétique d'un ensemble de bâtiments connectés à une seule chaufferie.

On remarque une bonne corrélation entre ces deux variables, et une droite, représentée par l'équation:

$$P = P_o - S \theta_e \quad (3)$$

peut être déterminée par régression linéaire.  $P_o$  est la puissance moyenne nécessaire pour maintenir la

température interne lorsque la température extérieure est nulle et  $S$ , appelée la signature énergétique, représente la sensibilité du bâtiment aux variations de température externes. En combinant les équations (2) et (3), on voit que:

$$S = \frac{H}{\eta_c} \quad (4)$$

et

$$P_o = \frac{H\theta_i - \eta_u(G_i + G_s)}{\eta_c} \quad (5)$$

On peut donc obtenir, au moyen de ces mesures, des informations sur des grandeurs physiques propres au bâtiment. De plus, une anomalie de fonctionnement se révèle rapidement par un point hebdomadaire s'éloignant trop de la ligne de référence. Enfin, cette technique permet d'observer rapidement l'effet de modifications apportées soit au bâtiment soit aux consignes de contrôle.

### Transmission thermique d'éléments d'enveloppe

Ce coefficient est défini, en régime stationnaire, par le rapport de la densité de flux de chaleur,  $q$ , à la différence de température  $\theta_i - \theta_e$  de part et d'autre d'un élément de construction. Si la question qui se pose est: **cet élément de construction est-il correctement isolé?**, il suffit, en principe, de mesurer la densité de flux de chaleur (avec un flux-mètre) et la différence de température après une période de temps suffisamment longue pendant laquelle les températures sont restées stables. Cette technique n'est toutefois utilisable que sur des éléments de construction légers (vitrages, panneaux légers), dans lesquels le régime permanent peut s'établir en quelques heures. Pour les autres éléments, les variations circadiennes de température maintiennent un régime dynamique, et des techniques d'interprétation plus évoluées s'imposent.

La méthode la plus simple consiste à prendre la moyenne des quantités mentionnées pendant une durée assez longue, comprenant un nombre entier de jours. Les effets dynamiques deviennent progressivement négligeables devant la quantité totale de chaleur ayant traversé l'élément. Toutefois, dans de nombreux cas où l'élément de construction possède une inertie significative et est soumis à des variations de température et de flux (notamment solaire) importants, cette méthode requiert un temps de mesure prohibitivement long. C'est pourquoi des méthodes d'identification tenant compte de la dynamique de la paroi ont été développées. La figure 3 montre l'efficacité de telles méthodes: pour un élément de construction lourd, bien isolé et soumis à des flux de chaleur variables, la méthode d'interprétation dynamique [6, 8 ou 9] permet d'obtenir une dispersion acceptable des résultats en 20 jours de mesure, alors que la méthode de la moyenne, même améliorée par une correction dynamique [7 et 9] nécessite plus du double de temps.

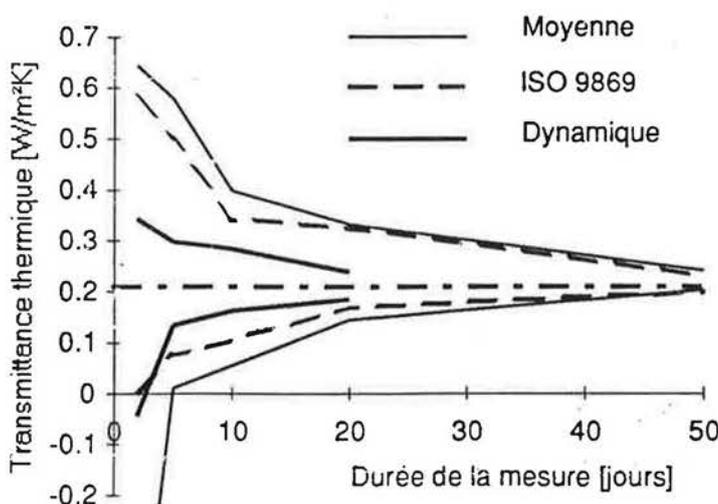


Figure 3: Résultats maxima et minima obtenus en effectuant 50 fois des mesures de transmission thermique dans un cas particulièrement difficile, en fonction de la durée de la mesure et de la technique d'interprétation utilisée

## Étanchéité à l'air

Pour obtenir une bonne qualité d'air intérieur tout en utilisant rationnellement l'énergie, il est nécessaire de contrôler les flux d'air, qui doivent donc passer par des dispositifs de contrôle manuels (fenêtres, ouvertures) ou automatiques (clapets hygro-réglables, installation de ventilation mécanique). Pour cela, il est essentiel que le reste du bâtiment soit étanche. Une telle étanchéité peut être obtenue par une construction soignée, et doit être contrôlée.

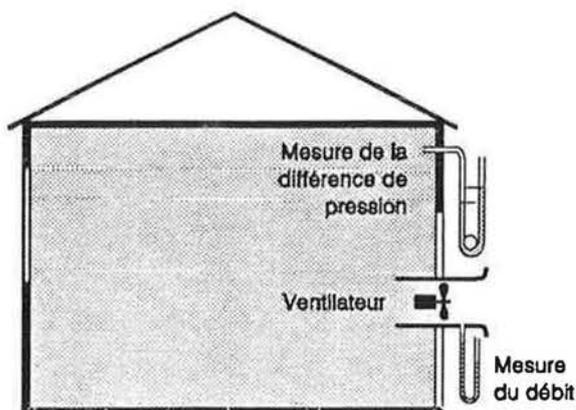


Figure 4: Représentation schématique de l'installation de mesure pour déterminer la perméabilité à l'air globale d'un bâtiment ou d'un logement. On remarquera la porte spéciale ("blower door") munie d'un ventilateur permettant de maintenir une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur tout en mesurant le débit d'air nécessaire à maintenir cette différence de pression.

Pour cela, un élément de l'enveloppe, généralement une porte, est remplacé par un panneau comportant un ventilateur et un système de mesure de son débit d'air (figure 4). Ce ventilateur permet de maintenir artificiellement une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, mesurée par le manomètre.

On mesure les débits d'air nécessaires à maintenir plusieurs différences de pression, ce qui permet de déterminer la relation entre le débit d'air  $Q$  et la différence de pression  $\Delta p$ . Une relation phénoménologique du type:

$$Q = C \Delta p^n \quad (6)$$

où  $C$  et  $n$  sont des paramètres propres au bâtiment mesuré peut être ajustée sur les résultats des mesures. L'exposant  $n$  peut varier entre 0,5 et 1, sa valeur la plus fréquente étant 0,6 environ. À partir de cette relation, on peut définir diverses caractéristiques conventionnelles, telles que le taux de renouvellement d'air à 50 Pa ou la surface de fuite équivalente [10].

La pressurisation alternante consiste à faire varier sinusoïdalement le volume du bâtiment au moyen d'un soufflet [11]. L'amplitude relative de la variation de volume est faible ( $10^{-4}$  à  $10^{-5}$ ) mais la faible différence de pression qui en résulte (quelques Pa) peut être extraite du bruit par détection synchrone, et une surface de fuite équivalente peut être déduite des mesures brutes.

Une technique encore en développement consiste à injecter rapidement, mais de manière contrôlée une masse d'air suffisante à l'intérieur du bâtiment, et de déduire les coefficient  $C$  et  $n$  de la relation (6) de l'enregistrement de l'impulsion de pression qui en résulte. La technique d'identification bayésienne (voir plus loin), qui semble être la seule utilisable pour cette méthode, est aussi très utile pour la pressurisation continue.

## Utilisation de gaz traceurs

Un gaz traceur sert à marquer une masse d'air dont on désire suivre le parcours. C'est idéalement un gaz ne se trouvant pas ou peu dans l'air, non toxique aux concentrations utilisées et facilement analysable en faible concentration dans l'air. Les gaz les plus couramment utilisés sont le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) ou gaz hilarant, l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ), des fréons et des perfluorés. Suivant le problème posé, ces gaz sont utilisés de différentes manières.

Si la question est: **quel est le débit d'air dans cette conduite?** on peut y répondre en injectant dans la conduite un débit  $q$  constant et connu de gaz traceur (figure 5).

La concentration de ce traceur est mesurée en aval, à une distance suffisante pour assurer un bon mélange de l'air et du traceur. En régime permanent, on a les relations suivantes entre le débit d'air,  $Q$ , la concentration mesurée,  $C$ , et le débit de traceur injecté,  $q$ :

$$C = \frac{q}{Q}$$

donc

$$Q = \frac{q}{C} \quad (7)$$

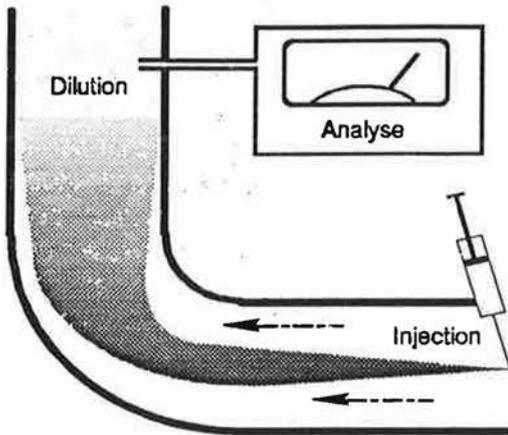


Figure 5: Principe de la mesure de débit par dilution de gaz traceur.

On peut aussi, à l'aide de gaz traceurs, répondre aux questions: **Quel est le débit d'air frais dans cette pièce?**, **Quel sont les débits d'air allant vers et provenant des pièces voisines?**

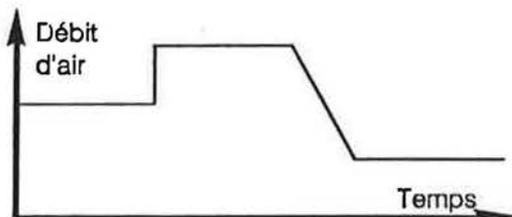
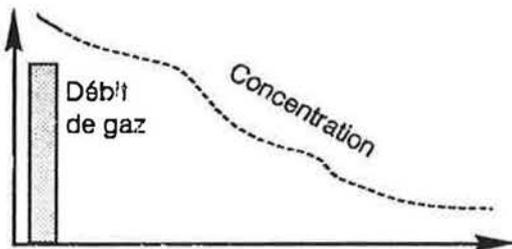
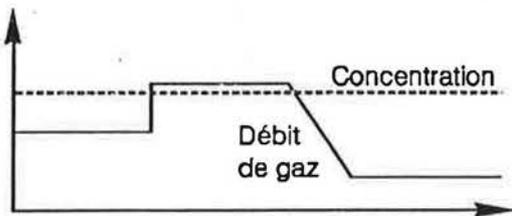


Figure 7: Déroutement dans le temps de la concentration et de l'injection de gaz traceur pour trois différentes procédures d'injection du gaz traceur.

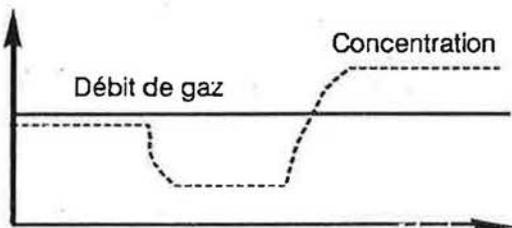
Exemple de débit d'air en fonction du temps



**Méthode du décrétement logarithmique:** Le gaz traceur est initialement mélangé à l'air de la pièce, et l'injection est arrêtée au temps zéro. La mesure du taux de décroissance de la concentration permet de déterminer le taux de renouvellement d'air.



**Méthode à concentration constante:** le débit d'injection du gaz traceur est continûment ajusté de manière à maintenir une concentration constante. Dans ce cas, le débit de traceur nécessaire est proportionnel au débit d'air entrant dans la pièce.



**Méthode à injection constante.** le gaz traceur est injecté à débit constant. En régime permanent, la concentration est inversement proportionnelle au débit d'air extérieur.

Les méthodes utilisées pour répondre à ces questions sont basées sur deux hypothèses: d'une part que les mouvements d'air restent constants pendant la mesure (de quelques minutes à une heure, suivant la méthode et les instruments utilisés) et d'autre part que le gaz traceur est bien mélangé à l'air dans les espaces mesurés.

Pour répondre à la première question, un gaz traceur est injecté dans la pièce à mesurer et marque l'air qui y est contenu. L'air extérieur entrant dans ce volume dilue le gaz traceur, et l'évolution de sa concentration permet de déterminer le débit d'air. Le gaz traceur peut être injecté selon différentes stratégies, les plus utilisées étant les trois décrites et illustrées sur la figure 7.

La réponse à la deuxième question nécessite l'utilisation de plusieurs gaz traceurs, ou la répétition de l'expérience en injectant un seul gaz traceur successivement dans les différentes pièces. Chaque gaz traceur marque alors l'air issu de la pièce où il est injecté. L'interprétation des mesures brutes nécessite la résolution d'un système d'équations différentielles [5].

Une question importante concernant la qualité de l'air est: **Est-ce que l'air que je respire est frais? Depuis combien de temps séjourne-t-il dans cette pièce ou dans ce bâtiment?** Ce temps est appelé l'âge de l'air. Il se mesure de façon dynamique en marquant soit l'air frais, lorsque l'endroit où entre l'air frais est connu, soit, dans le cas contraire, l'air contenu dans la pièce. L'injection de gaz traceur se fait soit en injectant rapidement une masse donnée, sous forme d'une impulsion (figure 8), soit en changeant le débit (de zéro à un débit constant ou le contraire). En première approximation, le temps nécessaire pour que ce changement soit perceptible en un endroit donné est égal à l'âge de l'air à cet endroit. En fait, l'interprétation exacte nécessite l'intégration dans le temps de la concentration mesurée [12 et 5]

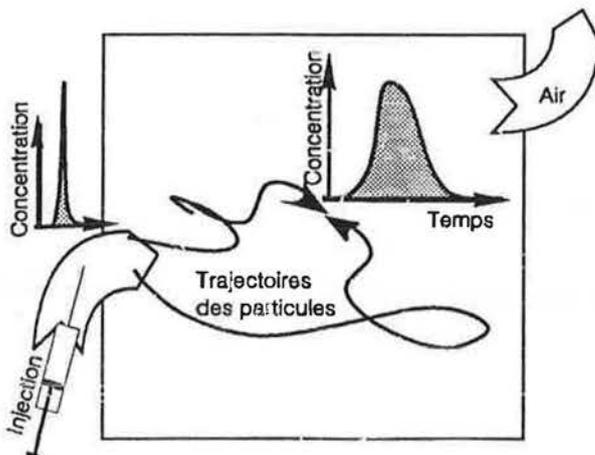


Figure 8: Principe de la mesure de l'âge de l'air par la méthode de l'impulsion.

L'âge moyen dans une pièce,  $\bar{\tau}$ , est la moyenne de l'âge de l'air en tous les endroits de la pièce. Il peut aussi se déterminer à partir de la concentration de gaz traceur dans la conduite d'extraction, si elle est unique.

D'autre part, il a été montré [12, 13] que l'âge de l'air à cette sortie est égal à la constante de temps nominale  $\tau_n$  de la pièce, (l'inverse du taux de renouvellement d'air), et que le temps  $\tau_r$  nécessaire pour renouveler complètement l'air dans une pièce est égal au double de l'âge moyen dans cette pièce. Ainsi, en injectant un gaz traceur dans l'entrée d'air frais et en suivant sa concentration dans la conduite d'extraction, on peut mesurer le rendement de renouvellement d'air, défini par:

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_r} = \frac{\tau_e}{2 \tau} \quad (8)$$

Ce rendement vaut 1 (100%) pour la ventilation par déplacement (ou en piston) et 0.5 pour les systèmes de ventilation assurant un mélange complet. Il peut être inférieur à 0.5 s'il y a des zones mortes dans le local mesuré.

## Nouvelles techniques

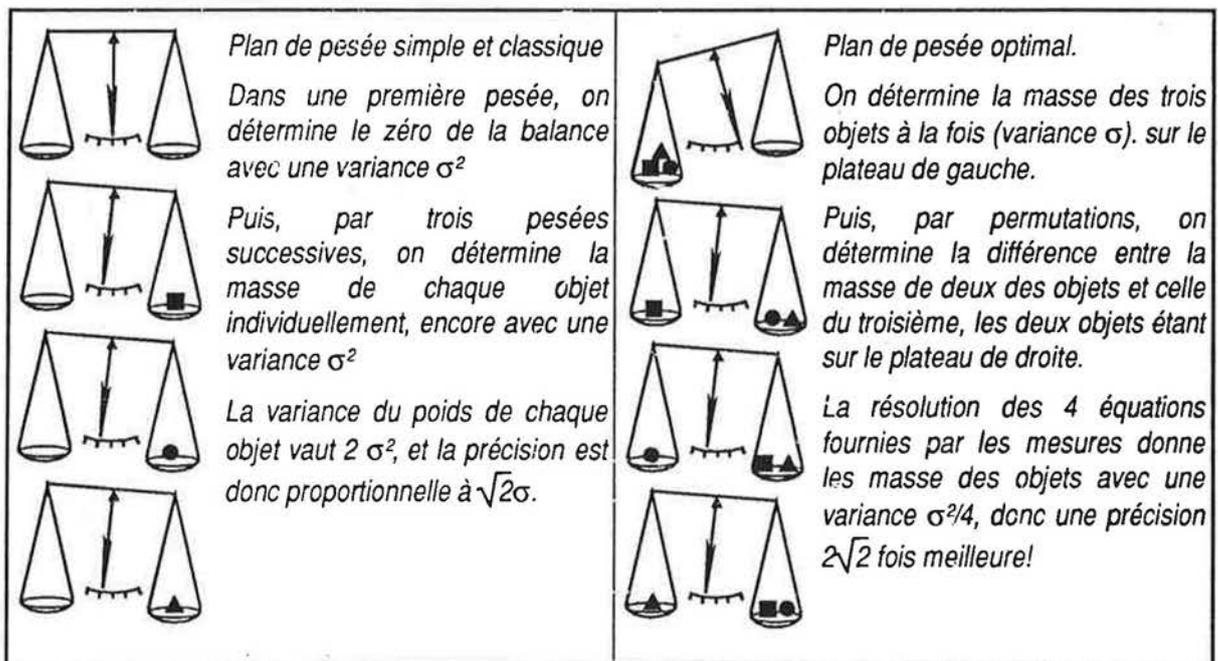
Avec l'arrivée sur le marché d'ordinateurs personnels puissants, plusieurs méthodes mathématiques ont pu s'appliquer avec succès aux techniques de mesurage. Ces outils peuvent même s'avérer, dans certains cas, indispensables à la résolution du problème posé. Quelques exemples donnés ci-dessous illustrent cette tendance.

### Théorie de la planification expérimentale

Dans le début de cette contribution, on a insisté sur la nécessité de planifier l'expérience avant de l'effectuer. Cette planification peut sembler aisée dans les cas simples, mais elle peut être extrêmement complexe si le nombre de variables est grand. L'expérience a montré que des outils mathématiques permettent non seulement de simplifier cette étape, mais encore peuvent rendre toute l'expérience beaucoup plus efficace [14, 15]. Un exemple très simple permet d'illustrer cette affirmation.

Supposons que nous ayons trois objets à peser, et que, pour effectuer cette pesée, nous disposions d'une balance à deux plateaux, indiquant la différence de masse entre les deux plateaux avec une variance  $\sigma^2$ .

Figure 9: Exemple d'optimisation de plan expérimental: pesée de trois objets.



La figure 9 illustre deux plans de pesée, l'un conforme aux coutumes et au bon sens, l'autre étudié pour fournir, avec un nombre d'expériences, et peut donc être estimée **avant** de faire les mesures. De telles techniques ont été notamment appliquées à la cartographie de l'âge de l'air dans une pièce [5].

### Identification par moindres carrés

Il arrive souvent que le problème soit ramené à l'identification des coefficients d'un modèle physique ou phénoménologique. Dans ce cas on mesure toutes les variables liées par un modèle donné, en répétant les expériences au moins autant de fois qu'il y a de paramètres. Ces expériences nous fournissent alors un certain nombre d'équations, dont la résolution permet d'obtenir les paramètres cherchés. Par exemple, il suffit en principe de deux mesures de débit et de pression pour identifier les paramètres  $C$  et  $n$  de la relation (6). Plus généralement, le modèle peut être de la forme:

$$y = f(a_0, a_i, x_j), \quad i = 1 \dots n \quad (9)$$

où  $y$  est la variable dépendante,  $x_i$  sont les variables indépendantes et  $a_0, a_i$  sont les paramètres à identifier. Il faut dans ce cas  $n+1$  expérience pour identifier les  $n+1$  paramètres.

Lorsqu'il y a plus d'expériences que d'inconnues, il est courant d'identifier les paramètres par la technique des moindres carrés, qui consiste à chercher les valeurs à accorder aux paramètres du modèle de manière à minimiser la somme des carrés des différence entre les valeurs. Les moyens de calcul actuels permettent aisément d'estimer ces valeurs des paramètres dans un temps raisonnable. La plupart des tableurs et des programmes d'assistance mathématique modernes contiennent les routines nécessaires, en tous cas pour les cas où le modèle (9) est linéaire. En particulier, l'interprétation dynamique utilisée pour la mesure du coefficient de transmission thermique des éléments de construction présentée plus haut [6, 8, 9] utilise de telles techniques, en minimisant la différence entre les flux de chaleur mesurés au cours du temps et ceux calculés (avec un modèle dynamique) sur la base des températures mesurées de part et d'autre de l'élément.

Toutefois, il faut rappeler que ces techniques reposent sur l'hypothèse que les variables indépendantes sont parfaitement connues (précision infinie), et que cette hypothèse est rarement vérifiée dans la pratique. Par exemple, dans le cas des mesures d'étanchéité à l'air, les incertitudes sur les différences de pression sont aussi importantes que celles sur les débits. Dans ce cas, il est possible d'appliquer des recettes de cuisine telles que la régression orthogonale, qui minimise la distance entre les points mesurés et la droite de régression, dans un système de coordonnées pondéré par l'estimation des erreurs expérimentales  $\epsilon_y$  et  $\epsilon_i$ . Les coordonnées sont alors:

$$\frac{y}{\epsilon_y}, \frac{x_1}{\epsilon_1}, \dots, \frac{x_i}{\epsilon_i}, \dots, \frac{x_n}{\epsilon_n} \quad (10)$$

Mais ces techniques d'identification ne mettent pas en évidence les relations éventuelles entre les coefficients, relations résultant des techniques de mesure et d'interprétation elles-même. Toujours dans le même exemple de la pressurisation, on remarque que les incertitudes sur les deux paramètres  $C$  et  $n$  sont liées, ou, qu'en d'autres termes, le domaine de confiance des paramètres dans le plan  $C, n$  n'est pas un disque mais une forme allongée: si, par suite des erreurs expérimentales, on surestime le paramètre  $C$ , on sous-estime *ipso facto* le paramètre  $n$ .

### Identification bayésienne

Comme indiqué plus haut, les technique d'identification par régression ne sont, en principe, applicables que lorsque les variables indépendantes sont bien contrôlées. Dans le cas contraire, une bonne technique devrait donner non seulement les paramètres les plus probables, mais aussi leur densité de probabilité. La technique d'identification bayésienne [16] peut s'avérer parfaitement adaptée à ce but. Elle peut se résumer comme suit.

Soit un vecteur  $z$ , contenant d'une part les données mesurées et d'autre part les valeurs des paramètres à déterminer, et admettons que ce vecteur soit une variable aléatoire dans un espace à  $k$  dimensions ( $k =$  nombre de données  $d +$  nombre de paramètres  $p$ ). et qu'il ait une distribution normale:

$$f(z) = A \exp \frac{-(z-z_p)^T C_z^{-1} (z-z_p)}{2} \quad (11)$$

où l'exposant  $T$  désigne la transposition et:

$A$  est une constante,

$z_p$  est le vecteur de connaissances *a priori*, qui contient les valeurs mesurées et des estimations raisonnables des valeurs des paramètres à identifier,

$C_z$  est la matrice des variances entre les éléments du vecteur  $z$ . Les éléments diagonaux contiennent les variances des grandeurs mesurées et celles des paramètres, estimées *a priori*. Ces dernières sont généralement assez grandes, car les connaissances *a priori* sont souvent minces.

La dernière hypothèse n'est pas essentielle mais simplifie les calculs. Les composantes du vecteur  $\mathbf{z}$  sont liées par un modèle, que l'on peut représenter par un système d'équations du type:

$$\rho(\mathbf{z}) = 0 \quad (12)$$

En général, le modèle n'est pas exact, et on peut supposer, pour simplifier, qu'il a, lui aussi, une distribution normale:

$$g(\mathbf{z}) = B \exp \frac{-\rho(\mathbf{z})^T \mathbf{C}_\rho^{-1} \rho(\mathbf{z})}{2} \quad (13)$$

où  $\mathbf{C}_\rho$  est la matrice des variances du modèle. En combinant la connaissance *a priori* avec le modèle décrit par sa distribution, on obtient une nouvelle distribution contenant l'information *a posteriori* [16]:

$$\sigma(\mathbf{z}) = C \exp \left[ -\frac{\rho(\mathbf{z})^T \mathbf{C}_\rho^{-1} \rho(\mathbf{z}) + (\mathbf{z} - \mathbf{z}_p)^T \mathbf{C}_z^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{z}_p)}{2} \right] \quad (14)$$

Le vecteur  $\mathbf{z}$  qui minimise l'exposant est le vecteur le plus probable. Il contient notamment les valeurs les plus probables des coefficients. En pratique, ce vecteur est obtenu en cherchant le minimum de l'exposant au moyen de méthodes numériques.

Cette technique a été appliquée à la méthode de mesure de l'étanchéité par pressurisation [17], et un résultat est illustré dans la figure 10.

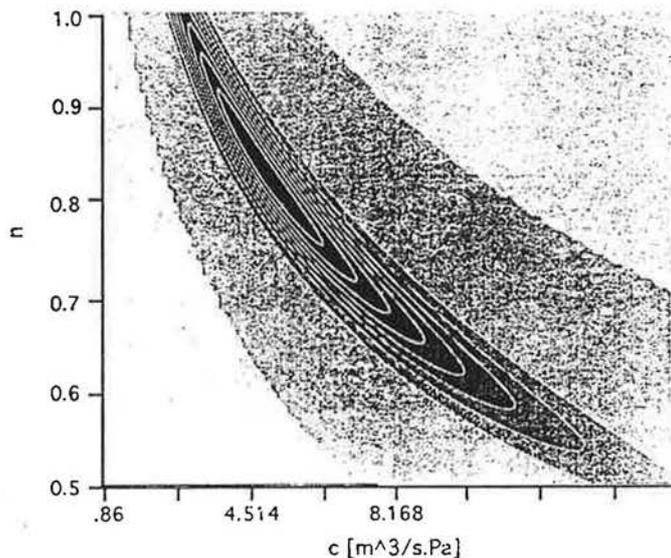


Figure 10: Distribution des coefficients de perméabilité (relation (6)) obtenus par identification bayésienne [17].

La relation d'allure hyperbolique entre les coefficients  $C$  et  $n$  correspond bien à ce que l'on observe lorsque l'on effectue de nombreuses mesures sur le même élément.

Chaque changement de teinte correspond à une variation de la densité de probabilité de 10%

## Conclusions

Lorsque le problème et les objectifs sont bien définis, il est possible et intéressant d'utiliser des techniques actuellement accessibles pour d'abord planifier et préparer les mesures, puis pour les interpréter. Aussi bien les méthode de planification des expériences que les méthodes de mesurage ont fait de grands progrès ces dernières décenies, et il serait regrettable de ne pas en profiter.

Les moyen d'améliorer la qualité de l'air tout en grantissant une utilisation rationnelle de l'énergie sont nombreux, mais ne peuvent être appliqués et adaptés à un bâtiment particulier que si la connaissance du fonctionnement de ce bâtiment est suffisante. Les stratégies et les outils d'investigation ainsi que les méthodes de mesurage peuvent aider considérablement à comprendre ce fontionnement et à en détecter les défauts.

## Références

- 1 Recknagel & Sprenger: Manuel pratique du génie climatique. *PYC Edition, Paris, 1986 (français) ou Oldenburg Verlag, Munich (allemand), 1979.*
- 2 G. V. Fracastoro, M. D. Lyberg: Guiding Principles Concerning Design of Experiments, Instrumentation and Measuring Techniques. *IEA-ECB Annex III report, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1983.*
- 3 ASHRAE Handbook of Fundamentals. *ASHRAE, Atlanta, 1985*
- 4 C.-A. Roulet, R. Brunner et al: Mesures in situ en énergétique du bâtiment. *Documentation SIA D-027, SIA, Zürich, 1989 (aussi en allemand).*
- 5 C.-A. Roulet & L. Vandaele: Air Flow Patterns Within Buildings - Measurement Techniques. *Tech. Note AIVC 34, Berkshire RG12 4AH, GB, 1992.*
- 6 S. Ahvenainen, E. Kokko, A. Aitomäkki: Thermal conductance of wall structure. *LVI teknikan laboratorio, report 54, Espoo (Finlande) 1980*
- 7 B. R. Anderson: The Measurement of U-values on Site. *ASHRAE-DOE-BTECC conference on Thermal Performance of Exterior Envelope of Buildings II, Clearwater Beach, Florida, 1985.*
- 8 C.-A. Roulet, J. Gass, I. Marcus: In situ U-value Measurement: Reliable Results in Shorter Time by Dynamic Interpretation of the Measured Data. *ASHRAE Transactions 93, 1987, pp 1371-1379.*
- 9 ISO 9869: Isolation thermique - Mesurage in-situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique d'éléments de construction. *ISO, Genève, 1992*
- 10 ISO DIS 9972: Isolation thermique - Mesurage de l'étanchéité à l'air des bâtiments - Méthode par pressurisation. *ISO, Genève, 1990*
- 11 M. P. Modera and M. H. Sherman: AC Pressurization: A Technique for Measuring the Leakage Area in Residential Buildings. *ASHRAE Trans. 91 II, 1985.*
- 12 M. Sandberg and M. Sjöberg: The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilation Studies. *Building and Environment, 12, pp 135-144, 1986.*
- 13 H. Sutcliffe: A Guide to Air Change Efficiency. *AIVC Technical Note 28, 1990. AIVC, Bracknell, Berkshire, UK.*
- 14 G. E. P. Box, W. G. Hunter, J. S. Hunter: Statistics for Experimenters: An introduction to Design, Data Analysis and Model Building. *John Wiley & Sons, New York, 1978*
- 15 J. Kiefer: Design of Experiments. *Springer Verlag, New York, 1985.*
- 16 A. Tarantola: Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. *Elsevier, Amsterdam, 1987.*
- 17 F. Forradini, J.-M. Fürbringer, C.-A. Roulet: Estimateurs Bayésiens des coefficients de perméabilité à l'air de l'enveloppe d'un bâtiment. *Travail pratique de diplôme LESO-PB, 1991.*