

#5818

Qualité de l'air intérieur  
études réalisées au Danemark

Bjarne W. Olesen, Ph.D.  
Brüel & Kjør, Danemark

### Introduction

Depuis les années soixantes, des études considérables ont été faites au Danemark sur la qualité de l'air et sur le confort en intérieur. Plusieurs universités et centres de recherche sont concernés par ce genre d'études. Les recherches les plus importantes ont été effectuées au Laboratoire de Chauffage et de Climatisation de l'Université Technique du Danemark. Plusieurs documents portant sur le confort thermique ont été publiés dans les années soixante-dix. Les résultats de ces recherches font maintenant partie de la norme internationale ISO 7730 [7] qui recommande l'indice PMV pour la mesure du confort thermique. Sont également incluses dans cette norme des directives pour les mesures d'asymétrie radiante, de courant d'air, d'écart vertical de température et de température de surface du sol.

Dans les années quatre-vingt, les recherches se sont particulièrement concentrées sur la qualité de l'air intérieur. L'objectif principal de ces recherches qui ont été conduites au Laboratoire de Chauffage et de Climatisation est d'établir des directives dont se serviront les ingénieurs de conception. À cet effet, deux nouvelles unités de mesure ont été introduites pour évaluer la qualité de l'air intérieur et le renouvellement d'air: "olf" et "décipol" pour la perception de la pollution de l'air ambiant.

L'Université d'Arhus et l'Institut d'Hygiène Professionnelle se sont également intéressés à des recherches en ce sens afin d'établir des directives pour déceler les sources de pollution intérieure comme les solvants. Ces établissements ont d'autre part conduit des études in situ pour l'évaluation de l'efficacité de la ventilation, et une méthode standard pour mesurer la qualité du nettoyage.

L'Institut de Technologie et l'Institut de Recherche en Bâtiment ont tous deux effectué de nombreuses recherches sur la mesure des infiltrations d'air et de l'efficacité de la ventilation, et conduit de longues études accompagnées de questionnaires sur la sensibilité des occupants à la qualité de l'air dans les écoles et dans les habitats collectifs rénovés.

Le présent document couvrira la définition des deux nouvelles unités citées plus haut, l'olf et le décipol, la mesure des valeurs "olf" dans les bureaux et dans les systèmes de ventilation, l'effet des turbulences sur les courants d'air et le développement des équipements pour mesurer les infiltrations avec un gaz traceur. Finalement, la plus grande étude danoise in

situ sur la climatisation intérieure, l'"étude des hôtels de ville", sera également présentée. Cette étude concerne la climatisation de 28 hôtels de ville et a été conduite par tous les instituts déjà cités.

### Les nouvelles unités: l'"olf" et le "décipol"

L'idée de base consiste à quantifier toute source de pollution de l'air d'un local par comparaison avec une source de pollution d'air parfaitement connue et servant donc de source de référence. À cet effet, on a choisi comme unité le niveau d'émission des sécrétions biologiques d'une personne type, en activité assise et à température ambiante jugée confortable. Cette unité est appelée "olf", du latin "olfactus" désignant l'odorat.

L'avantage de prendre une personne type comme critère de référence provient de ce que chacun connaît bien l'odeur du corps humain et que les nuisances provoquées par l'émission de bioeffluents de l'organisme ont fait depuis très longtemps l'objet de travaux poussés et qu'elles sont donc parfaitement connues. La Fig. 1 représente le pourcentage de personnes ayant jugé défavorablement la qualité d'un air ambiant dont on a fait varier le taux de renouvellement, c'est-à-dire le débit d'air neuf admis par personne présente. Il s'agit donc d'un pourcentage d'insatisfaits. La courbe repose sur des études très complètes [1], [3], réalisées sur un échantillon de plus de mille sujets des deux sexes travaillant en position assise dans une ambiance thermique agréable, la pollution résultant de l'émission de leurs bioeffluents ayant été évaluée par presque deux cents juges au seul moyen de leur sens olfactif. Il est donc ainsi possible d'exprimer numériquement au moyen de l'olf le degré de pollution de toute autre source.

En d'autres termes, le problème consiste à déterminer le nombre de personnes types qui produiraient le même degré de nuisances que la source de pollution considérée.

La courbe de la Fig. 1 permet de trouver la solution au problème de la quantification de l'intensité d'une source de pollution. En effet, connaissant le débit d'air neuf admis dans un local présentant une source de pollution ainsi que le pourcentage de personnes ayant jugé de la mauvaise qualité de l'air ambiant, on va pouvoir en déduire le nombre de personnes types produisant une pollution équivalente à celle de la source considérée.

C'est ce nombre qui va précisément définir en olfs le degré de nuisance de la source de pollution en cause.

Le niveau de pollution de l'air d'un local dépend non seulement de l'intensité de la source polluante mais également de sa dilution résultant du brassage de l'air intérieur par suite de la ventilation naturelle ou mécanique. La pollution de l'air perçue se définit comme étant la concentration de bioeffluents humains qui provoquerait la même insatisfaction que celle produite par la pollution ambiante effective. La pollution

ambiante perçue se mesure en "pols", unité qui tire son nom du mot latin "pollutio". Un pol est la pollution de l'air que l'on perçoit et qui a été causée par une personne type dans un local ventilé au taux d'air neuf de 1 l/s. On a donc: 1 pol = 1 olf/(l/s).

Afin de travailler avec des chiffres plus faciles à manier, on pourra utiliser comme unité de pollution d'air perçue le décipol: 1 décipol = 0,1 olf/(l/s).

Le décipol est donc la pollution d'air perçue dans une pièce où se trouve une personne type produisant une pollution de 1 olf, la pièce étant ventilée au taux de 10 l/s d'air neuf.

Comme pour la Fig. 1, on peut calculer un pourcentage d'insatisfaits en fonction de la pollution d'air perçue (Fig. 2), cette pollution étant due à l'émission d'une source qu'on juge après dilution. Voir Table 1 pour des exemples de valeurs "olf" mesurées.

### Quantification in situ des sources de pollution de l'air

Le bien-fondé de la nouvelle méthode de quantification des sources de pollution de l'air repose sur des études réalisées dans vingt bureaux et salles de réunion choisis au hasard à Copenhague [4]. Tous ces locaux disposaient d'une ventilation mécanique et aucun d'entre eux n'avait fait l'objet avant l'étude de problèmes d'ambiance particuliers. Chaque local a été étudié dans des circonstances précises:

- lorsqu'il était inoccupé et la ventilation arrêtée, de façon à pouvoir quantifier la pollution de l'air produite par les matériaux présents;
- lorsqu'il était inoccupé et la ventilation en marche, de façon à pouvoir quantifier la pollution de l'air produite par l'installation de ventilation;
- lorsqu'il était occupé et la ventilation en marche, afin de déterminer l'influence des occupants, y compris l'effet du tabac.

Chaque juge "par l'odorat" devait évaluer l'intensité des odeurs et dire s'il trouvait la qualité de l'air acceptable ou non. Tous les autres détails sur les conditions expérimentales sont donnés en [9].

Les pourcentages de personnes ayant trouvé l'air inacceptable lors des différents tests précédents se situaient entre 5% et plus de 70% et il est à noter qu'il n'a pas été possible de trouver de corrélation entre l'acceptabilité de l'air d'une part et le renouvellement d'air ainsi que la concentration en CO<sub>2</sub>, CO, en particules et composés organiques dans leur ensemble d'autre part.

Après avoir quantifié les sources de pollution de chaque local, on a pu tracer la courbe de la Fig. 2 à partir des moyennes de tous les locaux. Et le résultat tout à fait inattendu, presque incroyable, fut que, pour les 15 locaux à usage de bureaux d'une

surface de 230 m<sup>2</sup> avec 17 occupants représentant 17 olfs, l'installation de ventilation produisait à elle seule 58 olfs, et les divers matériaux (murs, meubles, etc.) 28 olfs. Quant à la fumée de tabac, elle représentait 35 olfs (Fig. 3).

Bien que les locaux ne soient occupés que par 17 personnes, on trouve donc un total de 138 olfs. Cela signifie que si l'on enlève les 17 olfs correspondant à 17 personnes "normales" ne fumant pas, toutes les autres sources de pollution sont équivalentes, pour chaque occupant réel, à 6 ou 7 autres personnes fictives. Deux de celles-ci correspondent aux matériaux, trois autres représentent le système de ventilation et les deux dernières simulent la fumée de tabac. Le taux de ventilation se situait aux alentours de 25 l/s par occupant, valeur nettement supérieure à toutes les normes. Tout technicien ou tout hygiéniste aurait qualifié le taux de ventilation de ces locaux de surfait et serait par conséquent très étonné des nombreuses plaintes concernant la qualité de l'air. Telle est l'explication du "syndrome des bâtiments malsains" [5], [8].

Si l'on tient compte maintenant des nombreuses personnes fictives, on s'aperçoit que le taux de ventilation atteint à peine 4 l/s par olf, valeur inférieure aux normes de ventilation courantes et qui explique les nombreuses plaintes.

#### Sources de pollution dans les systèmes de ventilation

On a étudié les sources de pollution dans les systèmes de ventilation de huit bâtiments. La qualité de l'air avant et après chaque partie du système fut évaluée en décipols par un groupe de 7 à 9 juges (Fig. 6), entraînés à percevoir la qualité de l'air en décipols par rapport à un gaz de référence [2].

La circulation de l'air à travers le système de ventilation a été réduite pour que soit augmentée la variation de la valeur en décipols associée à une partie spécifique du système. On a pu y arriver en réduisant la vitesse des ventilateurs d'air frais grâce à un convertisseur de fréquence, pendant que le ventilateur de sortie d'air est à l'arrêt et que l'amortisseur dans la conduite de sortie d'air est maintenu ouvert pour éviter les surpressions dans l'espace étudié.

L'étude a été conduite dans des bâtiments situés à Copenhague. Le débit d'air dans les systèmes de ventilation étudiés se situait entre 800 m<sup>3</sup>/h et 29000 m<sup>3</sup>/h et l'âge des systèmes variait entre 2 et 16 ans.

En partant des évaluations de la qualité de l'air avant et après chaque partie du système, il était possible de calculer la contribution de chaque partie à la pollution totale de l'air dans le système. La pollution de fond due au tube, au cône et à l'air extérieur a été soustraite de chaque mesure. En supposant une valeur olf constante et indépendante du débit d'air, on extrapole de l'augmentation mesurée en décipols pour chaque partie du système l'augmentation avec un débit d'air normal.



La valeur moyenne de l'augmentation en décipols causée par les différentes parties des huit systèmes de ventilation est indiquée par la Fig. 5.

La Table 2 montre l'augmentation totale de la pollution perçue dans l'air traversant le système de ventilation (conduites d'air exclues). Dans les huit systèmes, la pollution d'air perçue a augmenté d'une moyenne de 0,8 décipols. Le changement de la qualité de l'air dû aux conduites d'air n'a pas été mesuré.

La pollution des système de ventilation étudiés revient en majeure partie aux filtres, aux échangeurs de chaleur et aux humidificateurs.

### Équation de confort pour la qualité de l'air intérieur

L'utilisation des olfs et des décipols rend possible l'établissement d'une balance de pollution de l'air dans un espace donné. L'équation suivante implique que la pollution émise par les sources de pollution dans l'espace est prise par l'air extérieur fourni au même espace.

Le modèle montré en Fig. 6 représente la nouvelle équation de confort pour la qualité de l'air intérieur. Pour toute qualité perçue de l'air intérieur désirée, par exemple le pourcentage d'insatisfaits, l'équation de confort détermine la ventilation requise pour contenir la force totale de la source de pollution dans l'espace étudié. La qualité perçue de l'air extérieur est prise en considération dans notre modèle, et doit être déterminée pour évaluer la ventilation nécessaire.

L'équation de confort s'applique aux conditions de régime permanent et au mélange total de l'air dans l'espace étudié. Une équation correspondante peut être facilement mise en place pour les conditions transitoires et l'évaluation de l'efficacité de la ventilation.

Il est important de souligner que l'équation de confort prédit comment l'air est perçu. Quelques contaminants comme le radon et le monoxyde de carbone ne sont pas perçus mais peuvent toujours présenter des risques de nocivité. De tels contaminants devraient être considérés séparément.

### Turbulence des courants d'air

Les courants d'air posent de sérieux problèmes dans plusieurs bâtiments ventilés ou climatisés. Ce sont également des nuisances fréquentes à l'intérieur des véhicules, des trains et des avions. Un courant d'air est généralement défini par le refroidissement local indésirable du corps humain causé par les mouvements de l'air.

Les fluctuations de la vitesse de l'air peuvent être caractérisées par l'intensité de la turbulence, définie par  $[ET/v] \times 100$  (où ET = écart type, et v = vitesse moyenne de l'air). Des études in situ ont permis d'identifier l'intensité de la turbulence entre 30 et 60% dans les espaces à ventilation

traditionnelle. Dans les pièces avec ventilation par déplacement d'air ou dans les pièces à ventilation naturelle, la turbulence peut souvent être inférieure. Dans la présente recherche, l'impact quantitatif de l'intensité de la turbulence sur les risques de courant d'air a été étudié d'une manière systématique.

Une expérience a été conduite auprès de 75 hommes et 75 femmes exposés à un débit d'air avec des niveaux d'intensité de turbulence différents (0-70%) et à des températures allant de 20 à 26°C. Le sujet sédentaire a été exposé à six vitesses de l'air moyennes allant de 0,05 à 0,40 m/s. La direction du flux était dirigée de par derrière le sujet. On a demandé au sujet s'il sentait des mouvements d'air, et où il les sentait, et s'il était à son aise ou non.

Les résultats ont montré que l'intensité de la turbulence avait un impact significatif sur la sensibilité aux courants d'air. À partir de ces résultats, un modèle mathématique a été établi sur les risques de courant d'air (voir Fig. 7). Ce modèle prédit le pourcentage d'insatisfaits à cause des courants d'air en fonction de la température de l'air ( $t_a$ ), de la vitesse moyenne de l'air ( $v$ ) et de l'intensité de la turbulence ( $T_u$ ).

La Fig. 8 montre toutes les combinaisons de vitesse moyenne, d'intensité de turbulence et de température qui feraient ressentir des courants d'air à 15% des personnes.

#### Essais d'infiltration et de ventilation avec gaz traceur

Dans la perspective de récolter les informations nécessaires sur les vitesses de renouvellement d'air dans les bâtiments, un projet a été lancé par l'Institut de Technologie pour développer une méthode qui servirait à la mesure continue des vitesses de renouvellement d'air dans les habitations occupées. Des appareils ont été développés pour mesurer les vitesses de renouvellement d'air en utilisant la méthode de concentration constante en gaz traceur. Ils étaient prêts pour leur première apparition sur le terrain au cours de l'automne 1981.

Ces appareils ont été conçus pour effectuer des mesures dans des bâtiments de 10 pièces au plus. Avec une concentration maintenue à 50 ppm d'acide nitreux, la vitesse de renouvellement d'air est calculée à partir de la quantité d'acide nitreux nécessaire pour maintenir la concentration originale à un niveau fixe. Le gaz traceur est fourni à travers 10 électrovalves, et 10 autres servent à approvisionner les 10 locaux en échantillons d'air.

Après 18 mois d'utilisation, la première génération de ces appareils devait être réétudiée, la raison immédiate étant la recommandation d'un inspecteur d'hygiène et de sécurité nous déconseillant l'utilisation de l'acide nitreux comme gaz traceur.

L'année 1985 a vu la naissance de la troisième génération. Cette fois-ci, il s'agissait de concevoir un produit fiable, pratique et facile à utiliser. La Fig. 9 montre les deuxième et troisième générations.

Les équipements de troisième génération reflètent 10 années d'expérience danoise en mesure avec gaz traceur, et devraient rendre ce genre de mesure un outil pour la résolution de problèmes, et non une simple forme d'art.

### L'étude des hôtels de ville

Il s'agit, jusqu'ici, de l'étude la plus complète sur la qualité de l'air intérieur au Danemark [6], [10], [11], [12]. Tous les instituts de recherche mentionnés plus haut y ont participé. Le climat intérieur (ambiance thermique, lumière, bruit, qualité de l'air, etc.) a été évalué dans 14 hôtels de ville, et une enquête s'appuyant sur des questionnaires a été menée auprès de 28 bâtiments.

Les résultats ont révélé un nombre important de facteurs personnels et de travaux qui peuvent influencer sur l'incidence d'irritation de la muqueuse, de maux de tête et de fatigues. Même en tenant compte de ces facteurs, on a remarqué que l'état physique des bâtiments influe sur ces symptômes d'une manière négative. Les facteurs les plus importants étaient la température, la surface laineuse dans un bureau, le nombre d'étagères ouvertes, le volume de poussière sur le sol et la contribution organique des personnes occupant le bureau. La Table 3 indique le pourcentage de personnes influencées par divers facteurs physiques.

### Conclusion

Ce document n'a couvert qu'une petite partie des nombreuses recherches conduites au Danemark sur le climat intérieur. Il y a encore plusieurs autres projets en cours sur des sujets tels que l'élaboration d'un catalogue olf, la simplification des mesures in situ d'infiltrations avec gaz traceurs passifs, des mesures de ventilation par déplacement d'air, et la conception de modèles de circulation d'air dans les bâtiments, etc.

La qualité de l'air intérieur représentera dans le futur un domaine de recherche très important pour la CEE, et nous verrons bientôt naître beaucoup plus de projets avec la participation de plusieurs pays membres de la CEE.

## Références

- [1] Berg-Munch, B., Clausen, G. & Fanger, P.O.: Ventilation requirements for the control of body odor in spaces occupied by women. *Environment International*, (1986), 12, 195-199.
- [2] Bluysen, P., Kondo, H., Pejtersen, J., Gunnarsen, L., Clausen, G. & Fanger, P.O. A trained panel to evaluate perceived air pollution. *Proceedings of CLIMA 2000*, Aug. 1989, Sarajevo.
- [3] Fanger, P.O. & Berg-Munch, B.: Ventilation and body odor. *Proc. of An Engineering Foundation Conference on Management of Atmospheres in Tightly Enclosed Spaces*. ASHRAE, Atlanta, (1983), 44-50.
- [4] Fanger, P.O., Lauridsen, J., Bluysen, P. & Clausen, G.: Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit. *Energy and buildings*, Vol. 12, No. 1, (1988), 7-19.
- [5] Finnegan, M.J., Pickering, C.A.C., & Burge, P.S.: The sick building syndrome: prevalence studies. *Brit. Med. J.* (1984), 289, 1573-1575.
- [6] Franck, K.: Eye symptoms and signs in buildings with indoor climate problems (office eye syndrom). *Acta Ophthalmologica* 64, 1986. 3306-311.
- [7] ISO 7730, (1984): Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indexes and specification of the conditions for thermal comfort, International Standards Organisation, Geneva..
- [8] Kröling, P.: *Troubles de la santé et du bien-être dans les locaux climatisés*. München. Editions Zuckschwerdt (1985).
- [9] Lauridsen, J., Muhaxheri, M., Clausen, G.H., & Fanger, P.O.: Ventilation and background odor in offices, *Proc. of Indoor Air 87*, Berlin, Aug. 1987.
- [10] Nielsen, P.A.: Potential pollutants - Their importance to the sick building syndrome and their release mechanism. *Proc. of Indoor Air 87*. Berlin, Aug. 1987.
- [11] Skov, P., Valbjørn, O. & DISG: The sick building syndrome in the office environment. The Danish town hall study. *Proc. of Indoor Air 87*. Berlin, Aug. 1987.
- [12] Wolkoff, P.: Sampling of VOC indoor under condition of high time resolution. *Indoor Air*, Berlin, 1987.



## Tables

Table 1. Exemples de valeurs olf mesurées.

Personne assise, 1 met	1 olf
Personne active, 4 met	5 olf
Personne active, 6 met	11 olf
Fumeur en activité	25 olf
Fumeur, valeur moyenne	6 olf

Table 2. Augmentation totale de la pollution perçue dans l'air traversant un système de ventilation (conduites exclues).

Systeme	1	2	3	4	5	6	7	8	Moy.
Augmentation de la pollution d'air perçue (décipols)	0,53	0,19	0,96	1,67	0,45	1,23	0,97	0,49	0,81

Table 3. Pourcentage d'insatisfaits avec l'un des facteurs physiques.

Facteur	%
Courants d'air	30
Pieds froids	30
Variations de température	34
Hautes températures	19
Basses températures	21
Air confiné	36
Air sec	46
Air poussiéreux	25
Bruit dans le bureau	21
Bruit dans un autre bureau	11
Mauvais éclairage	14
Trop peu de lumière	11
Fumée de cigarette	17
Electricité statique	14

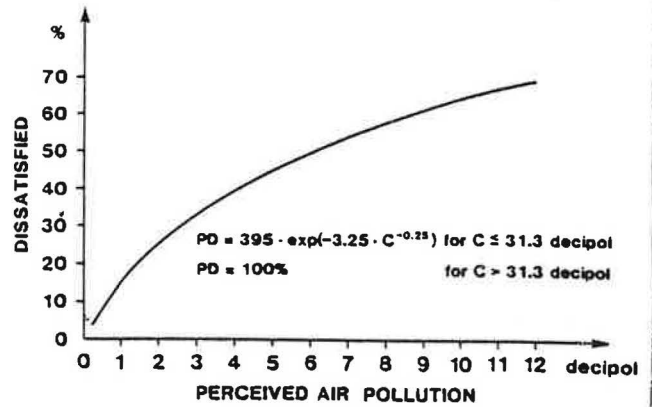
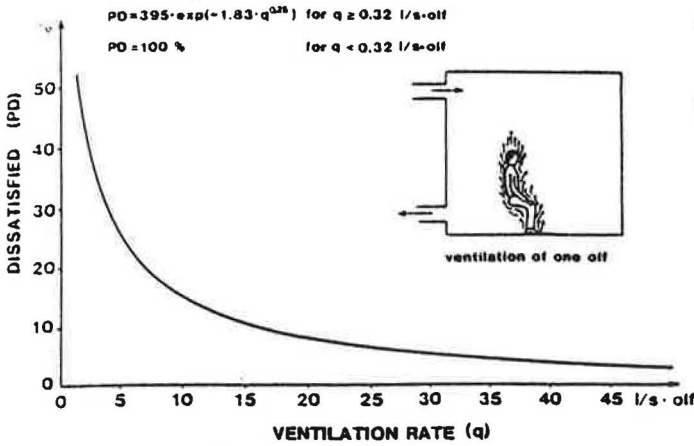


Fig. 1. Pourcentage de personnes qui, se trouvant dans un local dont on fait varier le taux de ventilation, trouvent la qualité de l'air inacceptable (débit d'air par personne). Le diagramme correspond au cas où l'homme constitue la seule source de pollution. On suppose que chaque personne est une personne type en activité assise en ambiance thermique confortable et respectant des conditions d'hygiène élémentaires, à savoir qu'elle prend un bain tous les 1,6 jours et qu'elle change de sous-vêtements tous les jours.

Fig. 2. La courbe définit le rapport qui existe entre le pourcentage de juges ayant trouvé les qualités de l'air inacceptables et la pollution d'air perçue exprimée en décipols.

**AVERAGE POLLUTION SOURCES IN 15 OFFICES**  
 Average Floor Area : 230 m<sup>2</sup>

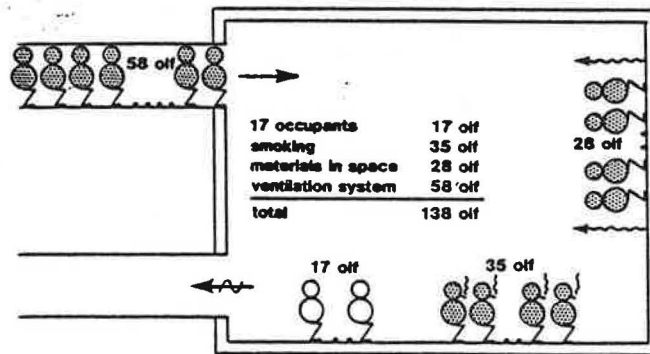


Fig. 3. Valeurs moyennes de différentes sources de pollution de l'air quantifiées dans 15 locaux à usages de bureaux à Copenhague. L'ensemble des locaux présentait une surface moyenne de 230 m<sup>2</sup> et 17 personnes y travaillaient. On a pu constater d'importantes différences entre les sources de pollution des différents locaux.

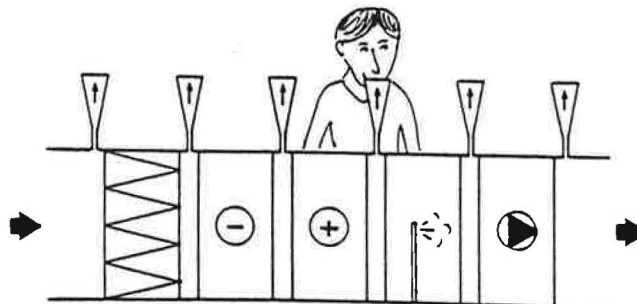


Fig. 4. Le principe de mesure. Un groupe de juges entraînés a évalué la qualité de l'air avant et après chaque partie du système de ventilation.

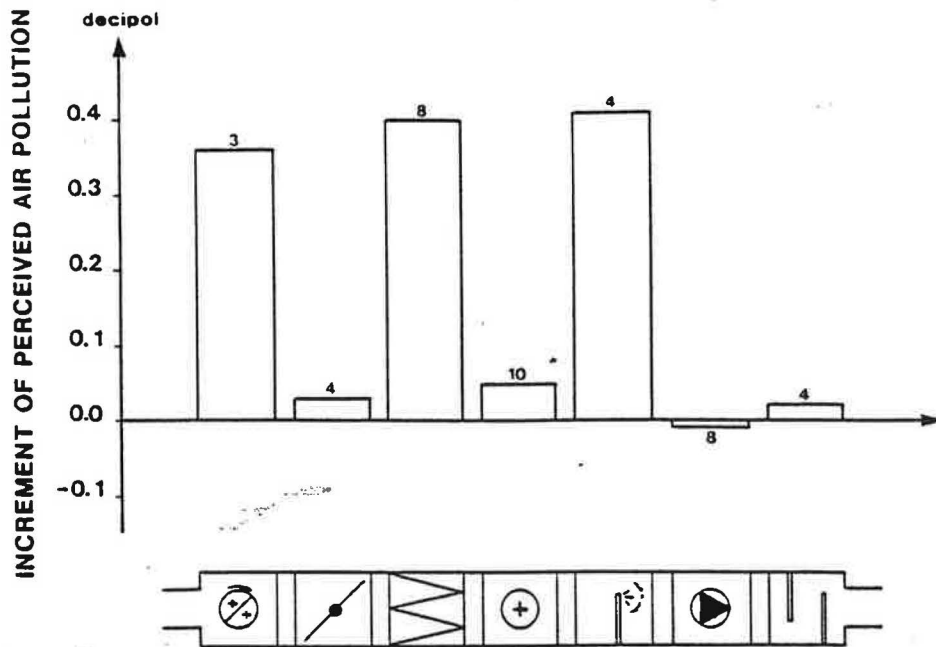


Fig. 5. L'augmentation moyenne de la pollution d'air perçue causée par chaque partie dans 8 systèmes de ventilation.

### COMFORT EQUATION FOR INDOOR AIR QUALITY

$$Q = 10 \frac{G}{C_i - C_o}$$

$$C_i = 112(\ln(PD) - 5.98)^{-4}$$

where **Q** = ventilation rate (l/s)  
**G** = total pollution sources (olf)  
**C<sub>i</sub>** = perceived indoor air quality (decipol)  
**C<sub>o</sub>** = perceived outdoor air quality (decipol)  
**PD** = percent dissatisfied (%)

Fig. 6. L'équation de confort pour la qualité de l'air intérieur.

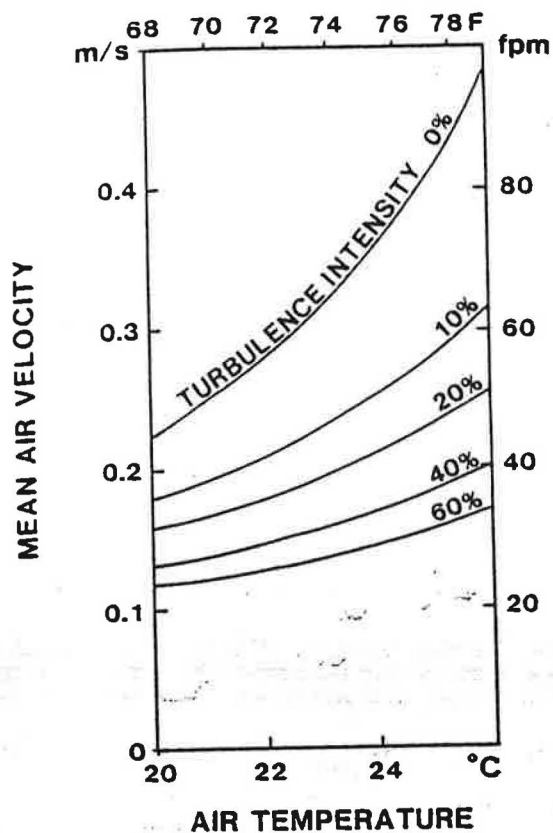


Fig. 8. Combinaisons de vitesse de l'air, de température de l'air et d'intensité de turbulence, qui seraient à l'origine de 15% d'insatisfaits. Ces combinaisons ont été déterminées à partir du modèle de courant d'air.

### MODEL OF DRAFT RISK

$$PD = (34 - t_a)(\bar{v} - 0.05)^{0.62} (0.37 \bar{v} Tu + 3.14)$$

for  $\bar{v} < 0.05$  m/s insert  $\bar{v} = 0.05$  m/s, for  $PD > 100\%$  use  $PD = 100\%$

where  $PD =$  Percentage Dissatisfied people due to draught (%)

$t_a =$  air temperature (°C)

$\bar{v} =$  mean air velocity (m/s)

$Tu =$  turbulence intensity (%)

Fig. 7. Le modèle de risque de courant d'air prédit le pourcentage d'insatisfaits en fonction de la température de l'air, de la vitesse moyenne de l'air et de l'intensité de turbulence. Le modèle s'applique aux personnes sédentaires.

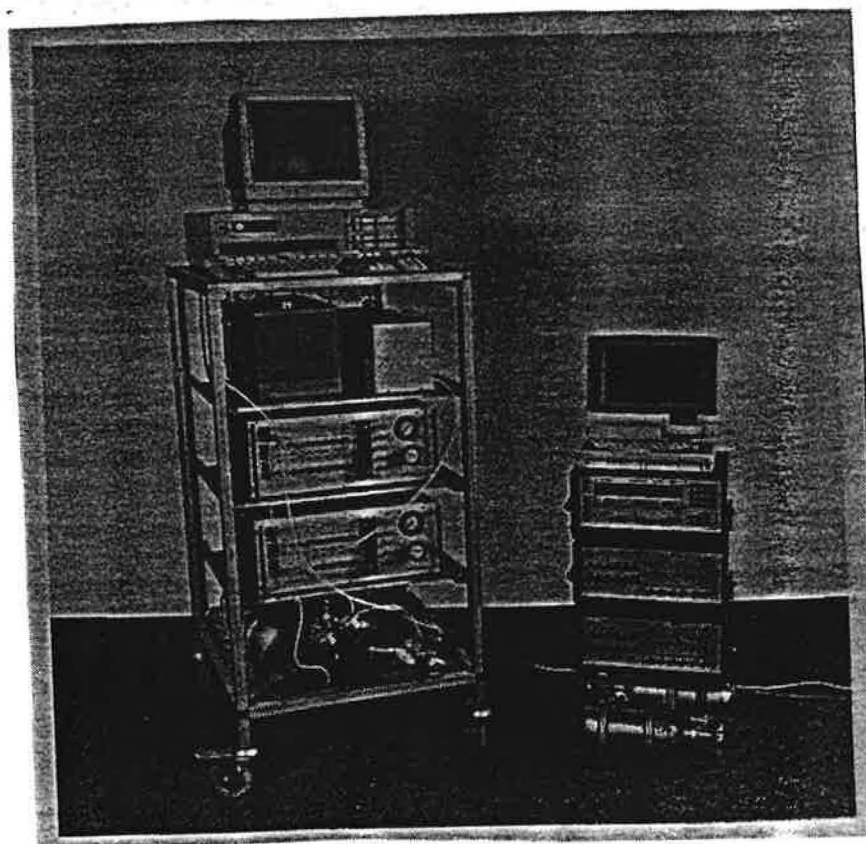


Fig. 9. Deuxième et troisième générations d'appareils de mesure avec gaz traceur.