

Organisation mondiale de la santé
Bureau régional de l'Europe
Copenhague



Rapports et Etudes EURO 78

Les expositions aux polluants de l'air des espaces clos et leurs effets sur la santé

Rapport sur une réunion de l'OMS

Nördlingen, 8-11 juin 1982

La présente publication est dédiée
à la mémoire du Dr Craig D. Hollowell,
Berkeley, CA, Etats-Unis d'Amérique,
éminent scientifique, spécialiste du problème
de la qualité de l'air des espaces clos,
et participant désigné du groupe de travail,
qui est soudainement décédé
le 18 janvier 1982 à l'âge de 41 ans.
La communauté scientifique perd en lui
un grand savant et un excellent ami.

ISBN 92 890 2244 2

© Organisation mondiale de la santé 1985

Les publications de l'Organisation mondiale de la santé bénéficient de la protection prévue par les dispositions du Protocole N° 2 de la Convention universelle pour la Protection du Droit d'Auteur. Pour toute reproduction ou traduction partielle ou intégrale, une autorisation doit être demandée au Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, 8 Scherfigsvej, DK-2100 Copenhague Ø, Danemark. Le Bureau régional sera toujours très heureux de recevoir des demandes à cet effet.

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation mondiale de la santé aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de firmes et de produits commerciaux n'implique pas que ces firmes et produits commerciaux sont agréés ou recommandés par l'Organisation mondiale de la santé de préférence à d'autres. Sauf erreur ou omission, une majuscule initiale indique qu'il s'agit d'un nom déposé.

Ce rapport exprime les vues collectives des participants et ne représente pas nécessairement les décisions ou la politique officiellement adoptées par l'Organisation mondiale de la santé.

SOMMAIRE

Page

Résumé	1
Introduction	2
Les caractéristiques de l'approche préventive	5
Estimation des expositions	7
Construction de modèles	7
Puissance des sources de pollution	9
Infiltration et ventilation	10
Méthodes de mesure	11
Evaluation des effets de la pollution des locaux sur la santé	15
Etudes toxicologiques sur l'animal	16
Etudes en milieu professionnel	16
Etudes par exposition contrôlée d'êtres humains	17
Etudes séquentielles	17
Etudes épidémiologiques	18
Connaissance des expositions et de leurs effets sur la santé	20
Le syndrome des «bâtiments malades»	25
Symptômes	25
Fréquence	27
Caractéristiques du syndrome des «bâtiments malades»	27
Causes suggérées du syndrome des «bâtiments malades»	28
Méthodologie et priorités des études futures	29
Conclusions	32
Recommandations	34
Bibliographie	35
Annexe 1 Composition des sous-groupes	39
Annexe 2 Comité d'orientation des travaux sur la qualité de l'air en espace clos	41
Annexe 3 Liste des participants	43

RESUME

Le groupe de travail sur l'évaluation et la surveillance des expositions aux polluants de l'air des espaces clos a été réuni par le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe en collaboration avec le gouvernement de la République fédérale d'Allemagne, pour faire le point sur cette question ainsi que sur celle des conséquences de ces expositions pour la santé, sachant que ce travail présente des difficultés particulières en raison du nombre et de la diversité des sources de pollution et des locaux à prendre en considération. On a observé beaucoup de cas de dommages graves causés à la santé de l'homme par des expositions, en espace clos, aux formaldéhydes, à l'oxyde de carbone et à d'autres produits des combustions en milieu pauvre en oxygène, ainsi qu'à une série de produits chimiques organiques provenant d'articles de consommation. Les insuffisances actuelles de l'évaluation des expositions chroniques à des concentrations mal définies de plusieurs polluants connus des locaux fermés posent un sérieux problème de santé publique.

Les membres du groupe ont fait le tour de ce que l'on savait alors au sujet des sources de plusieurs polluants fréquemment présents dans les locaux fermés, et des concentrations signalées. Ils ont évalué l'efficacité des moyens techniques de mesure existants et l'adéquation des données apportées par la surveillance des concentrations lorsqu'il s'agit d'estimer les expositions des populations. Ils ont dressé la liste des effets potentiels sur la santé de l'exposition à chacun des polluants, et ont déterminé dans quelle mesure les connaissances actuelles concernant les relations exposition-effet suffisaient pour évaluer l'impact total de ces polluants sur la santé publique lorsqu'on pouvait disposer d'estimations acceptables des expositions. Pour chacun des polluants, ils ont évalué la fraction de population exposée à de faibles concentrations, ainsi que celle exposée à des concentrations qui dépassent un seuil critique donné. Le groupe a jugé que, pour arriver à une quantification valable des effets nocifs d'un polluant de l'air sur la santé d'une population, il fallait d'abord disposer de données chiffrées sur l'exposition à ce polluant, sur la population exposée et sur la relation

exposition-effet. Il a considéré le cas de la fumée de tabac (inhalation passive), du NO₂, du CO, du radon, des formaldéhydes, du SO₂, du CO₂, de l'ozone, de l'asbeste, des fibres minérales, des substances organiques et des allergènes, et constaté, dans l'ensemble, que les instruments de mesure des expositions étaient en général d'assez bonne qualité, mais que les données réunies, grâce à la surveillance, sur la répartition des sources et des concentrations de polluants étaient insuffisantes ou plus que sommaires. Il a observé que les effets potentiellement nocifs sur la santé étaient pour l'essentiel connus, contrairement, bien souvent, aux relations exposition-effet, et notamment aux relations entre effets différés et expositions chroniques.

Le groupe a conclu que les connaissances du moment ne permettaient pas encore de chiffrer l'impact des polluants sur la santé publique. Cela étant, et dans l'attente d'une amélioration de ces connaissances, il a proposé, pour la plupart des polluants considérés, des estimations des concentrations au-dessous desquelles, à son avis, ces polluants n'exerceraient pas, en milieu clos, d'effets nocifs inacceptables sur la santé. De même, il a estimé les concentrations au-delà desquelles il fallait compter que les polluants considérés risquaient sérieusement de nuire à la santé.

Le groupe a formulé une série de recommandations sur les priorités et les méthodes de recherche à suivre afin d'estimer plus précisément l'effet de la pollution de l'air des espaces clos sur la santé publique, et afin de mettre au point des stratégies efficaces pour l'amélioration de la qualité de cet air.

INTRODUCTION

En raison de l'intérêt croissant porté à la qualité de l'air des espaces clos, on s'est trouvé amené à réaliser un certain nombre d'études et à organiser plusieurs réunions à ce sujet, notamment un premier symposium international sur les effets du climat intérieur des bâtiments sur le confort, l'activité et la santé de l'être humain (1), la réunion d'un groupe de travail sur les problèmes de santé liés à la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments (2), une étude du comité des polluants en espace clos créé par l'Académie nationale des sciences et le Conseil national de la recherche des Etats-Unis (3), un symposium sur les problèmes de santé causés par la pollution de l'air dans les locaux fermés (4), un symposium sur la qualité de l'air dans les espaces clos (5), enfin un symposium international sur la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments, la santé et les économies d'énergie (6).

Le groupe de travail sur l'évaluation et la surveillance des expositions aux polluants de l'air des espaces clos a été réuni par le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe en collaboration avec le gouvernement de la République

fédérale d'Allemagne. Il se composait de 13 conseillers temporaires venus de 10 pays, ainsi que de représentants du Siège de l'OMS et de la Commission des Communautés européennes. Le Dr M. Fugaš a été élu président, le Dr B. Seifert vice-président, et le Dr J.A.J. Stolwijk rapporteur. Le Dr M.J. Suess a exercé les fonctions de secrétaire scientifique. La liste des participants figure à l'Annexe 3.

Le groupe avait pour mission d'étudier les résultats des travaux déjà consacrés à la qualité de l'air en espace clos, ainsi que le dossier des travaux en cours ou en projet, afin de déterminer dans quelle mesure tous ces travaux pouvaient permettre d'évaluer sans trop tarder les expositions véritables des populations et les effets sur la santé qui pourraient en résulter. Il devait aussi étudier les avantages et les insuffisances des typologies des sources de polluants effectuées en laboratoire, les modèles prédictifs de l'action des concentrations de polluants en espace réel, le problème de la surveillance de ces concentrations sur le terrain et de la surveillance des sujets exposés, enfin celui de la détermination des effets sur la santé en laboratoire et sur le terrain. De plus, le groupe devait en principe chercher à savoir s'il serait nécessaire et avantageux de réaliser simultanément des études dans plusieurs pays et de coordonner entre elles ces études, à la fois dans le temps et du point de vue démarche adoptée et conception, considérant que les priorités des chercheurs des différentes disciplines appelées à y participer ne correspondraient pas forcément à celles qu'il faudrait respecter pour évaluer rapidement l'effet global, sur la santé, de la pollution des espaces clos dans son état actuel.

Les participants se sont répartis en sous-groupes pour étudier neuf grands volets du problème, à savoir : les expositions déjà connues des populations, leurs effets nocifs connus sur la santé, les concentrations jugées préoccupantes dans l'air des espaces clos, les normes existantes, la création éventuelle d'un comité international d'orientation des travaux sur la qualité de l'air en espace clos, l'évaluation des expositions et les priorités, le syndrome des «bâtiments malades», les concentrations de SO₂ et les rapports entre l'air des espaces clos et l'air extérieur, enfin les méthodes et priorités de l'évaluation des effets des polluants sur la santé de l'homme. La composition des sous-groupes est donnée à l'Annexe 1.

La qualité de l'air en espace clos a toujours posé un problème de santé publique et individuelle, mais ce problème s'impose davantage à l'attention depuis quelques années. On constate l'apparition de nouvelles sources de polluants, ainsi qu'une tendance à réduire la ventilation des locaux et les infiltrations d'air en raison de la hausse du coût de l'énergie, ce qui amène les occupants de ces locaux à se plaindre. Certaines études ont mis en évidence des points préoccupants. Comme les expositions sont fréquentes et ont des causes toujours semblables, il faudrait en savoir plus long sur les rapports et facteurs quantitatifs qui déterminent la qualité de l'air des espaces clos, de façon à pouvoir réduire le nombre des problèmes qui se posent, ainsi que leurs effets.

Il a été entrepris dans plusieurs pays des études globales des facteurs qui conditionnent la qualité de l'air en espace clos, de façon à pouvoir définir, puis adopter, des mesures efficaces allant de l'établissement de normes de ventilation minimales à la limitation de l'emploi, voire à l'interdiction absolue, de certains produits comme les mousses isolantes à base d'urée-formaldéhyde ou des appareils de chauffage au kérosène sans conduits d'évacuation. Il est toutefois reconnu que les maîtres de maison et les occupants des locaux resteront en partie responsables du maintien d'une qualité d'air acceptable et salubre à l'intérieur des locaux; il faut donc leur apporter des informations sérieuses et exactes pour qu'ils prennent leurs décisions et fassent leurs choix en connaissance de cause.

Pour déterminer les dispositions à adopter, il faut se souvenir que presque tous les polluants de l'air des espaces clos ont fait l'objet de rapports dénonçant leurs graves effets nocifs sur la santé, qui appellent des mesures correctives immédiates. Par ailleurs, des contrôles attentifs d'un grand nombre d'espaces clos ont démontré que beaucoup d'entre eux ne contenaient pas de concentrations de polluants inquiétantes du point de vue santé. Il est donc prouvé que les polluants de l'air des espaces clos peuvent gravement nuire à la santé, mais il n'est pas possible d'en chiffrer l'effet global sur la santé publique.

La qualité de l'air de tout espace clos, et plus précisément la concentration d'un polluant donné à l'intérieur d'un local, dépend de la qualité de l'air extérieur, de l'existence d'émissions provenant de sources à l'intérieur du local et de leur puissance, de la ventilation et du taux de renouvellement de l'air, ainsi que de la présence ou de l'absence de matériaux absorbants, filtres ou écrans, et de leur efficacité. Comme les propriétaires, ou les occupants, d'un local en choisissent selon leur goût l'équipement, l'aménagement et beaucoup d'autres matériaux, et comme leur comportement même peut modifier les propriétés de ce local, ils déterminent la qualité de l'air qui y est contenu au moins autant que le font les caractéristiques physiques et chimiques du local et les matériaux employés pour sa construction. Les fabricants d'articles de consommation influent eux aussi sur la qualité de l'air des locaux fermés par le choix des composants chimiques de leurs produits et par la clarté de leurs conseils et des modes d'emploi qu'ils proposent.

En raison de l'extrême variabilité intrinsèque des nombreux facteurs qui conditionnent la qualité de l'air des locaux fermés, on se heurte à des difficultés particulières lorsqu'on veut évaluer l'exposition des populations aux agents qui polluent cet air. On ne connaît pas suffisamment les caractéristiques de ventilation et d'infiltration de l'air dans les parcs immobiliers existants pour établir avec certitude les taux de dilution des polluants qu'on y rencontre. On ignore le nombre de cigarettes fumées dans chaque local, et on ne peut estimer que très aléatoirement la diffusion de la fumée de cigarette à l'intérieur des immeubles. On manque d'informations précises

sur l'emploi, sans conduits d'évacuation, des appareils de chauffage des locaux, des poêles à bois et à charbon, ainsi que des réchauds et fours de cuisine à gaz, comme sur leur répartition dans les bâtiments. Enfin, on n'en sait pas assez non plus sur la répartition des matériaux de construction, des produits d'entretien et de nettoyage, des mousses isolantes et des autres sources possibles de pollution de l'air des locaux fermés, non plus que sur les habitudes des occupants en matière de ventilation de ces locaux.

Il nous faudrait connaître non seulement la répartition de tous ces facteurs, mais aussi la manière dont ils se trouvent associés et réunis, ainsi que le nombre des personnes exposées à des environnements clos de cette nature. Il importe de connaître ces données pour évaluer l'impact des polluants et concevoir des stratégies efficaces pour le réduire.

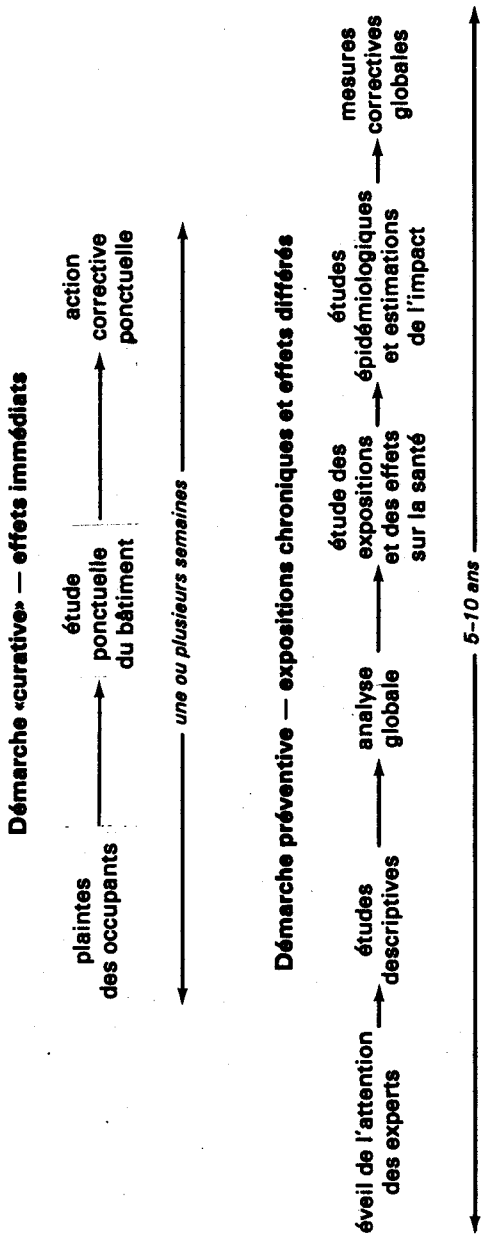
D'ordinaire, l'existence d'un problème de santé généralisé se constate au travers des cas déclarés d'exposition excessive. Au cours des vingt dernières années par exemple, on a observé une forme d'exposition particulière qui a causé suffisamment d'inquiétude pour qu'on la baptise le « syndrome des bâtiments malades ». La figure 1 indique les étapes de la démarche commune dite « préventive », qui mène à des mesures correctives générales, et celles de la démarche « curative » suivie dans le cas des « bâtiments malades ».

Les occupants de « bâtiments malades » se plaignent en général de façon énergique et systématique, ce qui conduit à la réalisation ponctuelle d'enquêtes « de diagnostic » et à la recherche des mesures correctives à appliquer au bâtiment en cause. Pourtant, on constate souvent dans ce cas des expositions très faibles. La démarche préventive, quant à elle, se met en route au vu de cas déclarés qui font état de très fortes expositions et qui amènent à s'inquiéter au sujet de populations beaucoup plus nombreuses.

LES CARACTERISTIQUES DE L'APPROCHE PREVENTIVE

Les déclarations de cas isolés d'exposition excessive constituent parfois le point de départ de l'action préventive décrite dans la figure 1. Dans ces cas-là, les personnes exposées, assez peu nombreuses, subissent un préjudice de santé si grave que les responsables de la santé publique et la presse en sont informés. Si les responsables de la santé et les experts constatent que les sources d'exposition sont nombreuses, que la coïncidence entre leur présence et les effets nocifs observés est marquée, et que ces effets sont graves, ils s'inquiéteront de leur impact non encore signalé sur l'ensemble de la population et entreprendront des études descriptives. En l'occurrence, il peut s'agir de surveiller sur le terrain les concentrations des polluants soupçonnés responsables. D'ordinaire, cela se pratique au moyen d'un

Fig. 1. Etapes et durée des mesures à prendre en cas d'expositions de la population en général ou de plaintes ponctuelles



matériel d'enregistrement classique (7, 8) dans un nombre limité d'espaces «typiques», ou dans des espaces où l'on sait qu'existent des sources de pollution potentielles. Dans d'autres cas, on peut employer un matériel spécialement conçu pour déterminer les expositions individuelles au moyen de compteurs portatifs actifs (9) ou passifs. Il arrive que les études descriptives portent sur un nombre limité d'espaces pour en définir les caractéristiques d'exposition (7, 8) sans pour autant évaluer les effets sur la santé, ou vice versa (10, 11). Ou encore, les deux démarches peuvent être appliquées ensemble à un échantillon pas tout à fait représentatif d'une population beaucoup plus nombreuse (12). Ces études descriptives améliorent la connaissance des faits et permettent aux experts et aux autorités de la santé de mieux cerner la nature et l'ampleur potentielle de l'impact des différents polluants de l'air sur la population.

Les connaissances, à ce point précis de l'approche préventive, laissent souvent encore beaucoup à désirer : les expositions observées sont encore exclusivement celles qui caractérisent les espaces étudiés et leur description n'est pas toujours suffisamment représentative. D'ordinaire, on connaît alors la nature des effets nocifs immédiats sur la santé, mais on en sait très peu sur celle des effets à long terme et sur leur relation avec les expositions, notamment dans des groupes bien particuliers de population. A bien des égards, la connaissance de la pollution de l'air des locaux fermés consiste simplement à ce point à confirmer les craintes initiales et à constater qu'elle exerce un impact considérable sur la santé publique. Il faut ensuite entreprendre de nouvelles recherches coordonnées pour quantifier cet impact et élaborer des mesures correctives. Cela veut dire que la mesure de la pollution et sa surveillance devraient permettre d'estimer les expositions de populations représentatives et globales au moyen de modèles d'expositions construits à partir d'informations sélectives mais relativement limitées. De même, l'étude des effets sur la santé devrait s'attacher essentiellement à déterminer les relations exposition-effets dans différents groupes de population, afin de permettre une évaluation plus sûre de l'impact global de la pollution sur la population et des mesures correctives à adopter.

ESTIMATION DES EXPOSITIONS

Construction de modèles

Lorsqu'il s'agit de mesurer et surveiller la pollution de l'air en espace clos, puis d'en construire des modèles, il importe de ne pas perdre de vue qu'il est impossible de mesurer ou surveiller l'ensemble des polluants significatifs de l'air dans tous les espaces occupés par une population assez nombreuse. Il

faut donc estimer les taux de la pollution en espace clos au moyen d'une équation d'équilibre global, dont on aura calculé ou estimé au mieux les coefficients et les constantes.

Cette équation, dans sa forme la plus simple, et appliquée à un local ou espace clos unique où l'air se trouve bien brassé, se lit comme suit :

$$V \frac{dC_i}{dt} = P - E - Q(C_i - C_o) \quad (1)$$

où V = volume d'air contenu dans l'espace considéré,

C_i = concentration du polluant dans cet espace,

t = temps,

P = vitesse de production ou d'émission du polluant dans l'espace considéré,

E = taux d'élimination du polluant par réaction chimique, filtration ou déposition,

Q = vitesse des échanges d'air avec l'atmosphère extérieure, par infiltration ou ventilation, et

C_o = concentration du polluant dans l'air extérieur.

En état de stabilité, cette équation se ramène à la suivante :

$$C_i = C_o + \frac{P - E}{Q} \quad (2)$$

Les équations 1) et 2) représentent des simplifications extrêmes s'il s'agit d'émissions occasionnelles d'un polluant dans un local où le brassage d'air est insuffisant, ou dans une pièce lorsqu'il faut évaluer la concentration dans une autre pièce. Beaucoup de chercheurs se sont servi d'équations dérivées du modèle 1) pour l'estimation du CO et des particules en suspension associés à l'émission de fumée de tabac (13). Drivas et al. (14) ont utilisé ce type de modèle pour évaluer les systèmes de ventilation. Jacobi (15) a étudié l'interaction entre ventilation et concentration de radon. Berglund et al. (16) ont signalé les différences de comportement de plusieurs composés dans des conditions de variation expérimentale de la ventilation d'un immeuble commercial.

Lorsqu'on se sert de modèles pour déterminer la pollution de l'air d'un local clos, il faut d'abord calculer les constantes et les coefficients propres à l'espace considéré, puisque les résultats obtenus grâce au modèle ne peuvent être plus exacts que ne le sont ces valeurs. Il est donc indispensable de s'assurer de la justesse des estimations sur modèle en mesurant exactement

la pollution dans une partie au moins de l'espace reconstitué dans ce modèle. Moschandreas et al. (17) et l'OMS (18) se sont penchés sur la question et ont étudié quelques résultats obtenus.

Il est parfois possible de simplifier encore l'équation 2) en partant de l'hypothèse supplémentaire que le taux d'élimination de certains polluants produits ou émis en espace clos est très faible ou nul, et que leur concentration dans l'air extérieur, elle aussi très faible, peut souvent être négligée; on peut alors retirer de l'équation les expressions correspondantes.

Si l'on a affaire à un polluant produit à l'extérieur, puis absorbé ou inactivé à l'intérieur, il existe une équation simplifiée sans P . Le taux d'infiltration d'air ou de ventilation d'un espace compte énormément, car c'est lui qui détermine en grande partie le degré de pollution de l'air de cet espace. Avec les appareils de chauffage sans conduits d'évacuation, l'augmentation de la ventilation réduit d'autant l'exposition en état de stabilité ou l'exposition totale aux produits de combustion. Lorsqu'on calcule la concentration d'ozone de lieux chargés de brouillard photochimique, on s'aperçoit normalement qu'elle est plus faible à l'intérieur des locaux qu'à l'extérieur, phénomène qui s'explique par la réactivité de l'ozone en présence du mobilier et du contenu des locaux. Dans ce cas, l'augmentation de la ventilation provoque une *augmentation* de la concentration d'ozone à l'intérieur.

Puissance des sources de pollution

Pour construire des modèles quantitatifs de la pollution des locaux fermés, il importe beaucoup de connaître la puissance (P) des sources, qu'il s'agisse de matériaux, d'appareils, d'humains, d'animaux domestiques ou d'activités qui produisent ou émettent des polluants de l'air intérieur dans certaines circonstances.

Leaderer (19) a mis en évidence les coefficients d'émission des appareils de chauffage au kérosène. Mølhave et al. (20) ont étudié les émissions de 42 matériaux couramment employés dans la construction. On peut définir les coefficients correspondant à d'autres sources, par exemple la fumée de cigarette (21), le radon émis par les matériaux de construction, l'eau des robinets (22, 23) et les formaldéhydes (24). C'est dans les conditions rigoureusement contrôlées du travail en laboratoire que se mesure le mieux la puissance des sources, mais on peut aussi l'estimer souvent à partir de mesures effectuées sur le terrain, si elles sont assez complètes, en appliquant l'équation 2) pour trouver la valeur de P .

Lorsqu'il s'agit de produits de nettoyage ou d'entretien et de bon nombre d'autres articles de consommation, il est possible d'estimer la puissance d'émission, par la source, de tous les polluants volatils, si l'on connaît la quantité de matériau employée, la composition du matériau et son temps de séchage.

On pourrait à l'avenir évaluer plus facilement les expositions aux polluants de l'air des locaux fermés à condition de concevoir des expériences et des systèmes de mesure qui permettraient de se renseigner, autant que faire se peut, sur la puissance des sources.

Infiltration et ventilation

Tout espace clos, sauf s'il l'est hermétiquement, subit des échanges d'air avec l'atmosphère extérieure par infiltration et diffusion, et il s'agit très souvent là de la seule forme d'échange d'air en local fermé. Il se peut que certaines pièces laissent filtrer plus d'air que d'autres, en fonction de la direction et de la vitesse du vent, de la taille des fissures aux fenêtres et aux portes, etc.

D'autres bâtiments disposent exclusivement de systèmes de ventilation forcée qui remettent d'habitude en circulation une bonne partie de la quantité totale d'air contenu, et en expulsent la partie restante, la remplaçant par de l'air extérieur. D'ordinaire, on exprime les taux d'infiltration et de ventilation en renouvellements de l'air par heure, autrement dit en nombre de fois par heure qu'un volume d'air extérieur égal au volume total de l'espace pénètre dans ce dernier. En général, ces taux ne descendent pas au-dessous de 0,2 renouvellement par heure et, lorsqu'ils dépassent ce chiffre, le chauffage ou le rafraîchissement de l'air extérieur coûte très cher en énergie. On utilise essentiellement deux méthodes pour mesurer le renouvellement de l'air d'un espace clos. La plus courante consiste à y introduire un gaz traceur en quantité suffisante pour porter rapidement la concentration de ce gaz jusqu'à 10 à 100 fois au moins le minimum que peut mesurer un appareil de contrôle. Si l'air de cet espace est bien brassé, la réduction de cette concentration, observée par l'appareil, indiquera le taux de renouvellement conformément à l'équation 1).

Un certain nombre de gaz peuvent servir de traceurs, entre autres le radon, le N_2O , le CO_2 et le SF_6 . Assez récemment, Dietz et al. (25) ont préconisé d'employer le perfluoro-diméthyl-cyclohexane comme traceur de source constante pour calculer les taux d'infiltration dans des concentrations à l'état stable.

Une toute autre façon de déterminer la résistance d'un bâtiment aux infiltrations consiste à surpressuriser légèrement l'ensemble de l'édifice, puis à mesurer le débit d'air nécessaire au maintien de la pression ainsi obtenue (26).

Ces mesures présentent l'avantage de ne pas être particulièrement faussées par des changements momentanés de la vitesse ou de la direction du vent. Mattingly & Peters (27) ont étudié l'influence du vent et d'autres facteurs sur les taux d'infiltration et ont constaté, dans un même espace, des variations de 0,2 à 2,3 renouvellements par heure selon la direction du vent, la présence de pare-vents et la superficie exposée des murs extérieurs des

espaces constituant un ensemble donné. On a proposé toute une série de techniques pour l'estimation des taux d'infiltration en fonction des caractéristiques des bâtiments (28-30).

Grot & Clark, qui ont mesuré les taux d'infiltration naturelle dans plusieurs dizaines d'habitations situées dans trois zones climatiques des Etats-Unis (31), ont observé qu'ils s'établissaient en moyenne à 1,2 renouvellement par heure (erreur type : 0,86 r/h) en Caroline du Sud sous climat tempéré, et à 0,77 r/h (erreur type : 0,57 r/h) dans le Dakota du Nord où l'hiver est rigoureux.

Pour évaluer la pollution de l'air en espace clos, il faut mesurer ou estimer le taux d'infiltration ou de ventilation. Ce taux accuse des variations systématiques imputables aux caractéristiques des bâtiments et aux pratiques de construction, qui peuvent faciliter les estimations, mais il faut effectuer les mesures dans un certain nombre d'espaces pour établir le taux moyen de renouvellement de l'air typique de chaque catégorie. Les divers espaces d'un bâtiment présentent souvent des taux de ventilation différents, et le comportement de leurs occupants peut y introduire une variation supplémentaire. La puissance de certaines sources, mais pas de toutes, peut varier davantage, d'un espace clos à un autre, que les taux d'infiltration dans ces espaces. Des normes concernant les taux d'infiltration ou de renouvellement figurent dans les codes du bâtiment ou les pratiques de construction recommandées. En République fédérale d'Allemagne, on a proposé un taux de 0,8 renouvellement/heure (32). En Suède, le règlement de 1980 sur la construction interdit des taux de renouvellement supérieurs à 3 r/h, pour les habitations individuelles et à 1 r/h pour les immeubles de plus de trois étages, avec une surpression intérieure de 50 Pa. De plus, il faut assurer une ventilation positive qui apporte 0,35 l/s d'air extérieur par m² au sol dans les bâtiments d'habitation (33).

Méthodes de mesure

Mesure de l'air intérieur des locaux

La mesure constitue la méthode la plus directe pour déterminer les concentrations de polluants de l'air des espaces clos. On peut la pratiquer à des fins diverses, en variant les techniques et les types d'instruments; elle est le plus souvent assez longue et onéreuse.

Lorsque les habitants d'un bâtiment se plaignent sans cesse et unanimement de malaises ou de troubles de santé aigus ou chroniques, on analyse souvent l'air intérieur de ce bâtiment pour connaître les polluants en cause et leurs concentrations. Il s'agit alors de choisir les techniques de mesure, ainsi que les points et les moments de prélèvement de façon à résoudre un problème ponctuel qui se pose dans un bâtiment donné. Il est probable que ces opérations de mesure ne contribueront que d'une manière limitée à faire mieux comprendre le problème général de la pollution de l'air en espace clos.

De nombreuses études consacrées à la mesure et au contrôle des concentrations de polluants dans l'air des espaces clos portent sur la répartition de ces polluants dans certains types de bâtiments, parfois en fonction de la présence de certaines sources. Si, en l'occurrence, on mesure simultanément les concentrations de polluants dans l'air extérieur et les taux d'infiltration, on peut évaluer la puissance des sources contenues dans les espaces considérés. Lorsque ces mesures s'accompagnent d'observations détaillées des caractéristiques et du contenu des bâtiments, elles peuvent servir à l'élaboration de modèles prédictifs des concentrations de polluants de l'air dans des bâtiments similaires, ou pour confirmer la justesse des modèles prédictifs construits à partir d'autres séries de données.

On mesure les concentrations de polluants en espace clos de trois façons :

- par prélèvements ponctuels;
- par prélèvements accumulés dans le temps;
- par une surveillance continue en temps réel.

Prélèvements ponctuels. La façon la plus simple consiste à prélever de l'air en une fois dans un récipient, ou à faire passer un volume d'air connu à travers un matériau absorbant. Les récipients, qui doivent être imperméables au gaz recherché, peuvent se présenter sous la forme de bouteilles en matière plastique, de sachets en Mylon ou en Tedlar, ou de tubes de verre remplis d'absorbant (34).

Si la concentration risque de varier dans le temps, il faut pratiquer une série de prélèvements successifs. Pour une efficacité maximale des prélèvements ponctuels, il faut que le matériel d'analyse se trouve placé en un point central. La méthode, peu onéreuse, a par contre le défaut de ne couvrir qu'une période assez courte, et il se peut que la concentration relevée ne corresponde que de loin à une «moyenne».

En général, les prélèvements ponctuels se font avec d'assez petites quantités d'air; c'est pourquoi le matériel d'analyse doit pouvoir relever directement les concentrations ambiantes et intérieures. Il est possible d'effectuer un grand nombre de mesures sur le terrain à l'aide d'un même instrument, mais l'économie ainsi réalisée sur l'investissement est souvent compensée par le coût plus élevé de l'acquisition et de l'analyse des données.

Prélèvements accumulés. Il est postulé que les effets de beaucoup de polluants, y compris ceux de la masse totale des particules en suspension et ceux du radon et de ses descendants, sont proportionnels aux concentrations moyennes de ces polluants sur longue période, et on préfère dans leur

cas des techniques de mesure qui permettent de connaître aussi leur concentration accumulée avec le temps. Le plus souvent, on mesure la concentration moyenne, sur 24 heures ou davantage, des particules en suspension recueillies sur un papier filtre à travers lequel on a fait passer une quantité d'air connue. Sur le plan de la méthode, ces mesures présentent de l'intérêt chaque fois que les concentrations ponctuelles s'établissent au-dessous du seuil de détection des instruments d'analyse et qu'il est possible d'augmenter la concentration des substances à analyser par accumulation sur papier filtre ou au moyen d'un absorbant liquide ou solide. On peut recueillir les gaz solubles, formaldéhydes et SO_2 par exemple, par barbotage ou lavage. Il faut bien entendu connaître ou déterminer le débit total pendant la période d'accumulation. Les mesures à partir d'échantillons accumulés sont relativement peu coûteuses et relativement précises, mais la difficulté d'assurer le contrôle de qualité de l'opération contrebalance tant soit peu ces deux avantages. Les prélèvements accumulés conviennent moins lorsque les effets des polluants atmosphériques n'ont pas de relation linéaire avec leurs concentrations. Ils ne sont donc pas à recommander pour des polluants tels que l'ozone, dont les effets biologiques sont proportionnels aux concentrations sur courte période qui ne ressortent pas des mesures cumulatives sur relativement longue période.

Les prélèvements accumulés reposent sur deux principes. A l'origine, on pratiquait le plus souvent des prélèvements dits «actifs» qui consistaient à aspirer, au moyen d'une pompe, une quantité connue d'air, avec un débit constant, à travers un matériau absorbant ou un filtre, puis à peser ou mesurer, par des méthodes chimiques ou colorimétriques, le polluant accumulé ou recueilli. Les appareils portatifs de prélèvement actif fonctionnent au moyen de pompes alimentées par accumulateurs, ce qui les rend encombrants, lourds et coûteux.

Depuis les premières années 60, on utilise couramment un nouveau type d'appareil, dont Palmes (35) a décrit un des modèles primitifs. Les échantillonneurs dits «passifs» fonctionnent sur le principe de la diffusion ou de l'osmose de l'air ambiant à travers un obstacle où se déposent les molécules polluantes. Ils consistent essentiellement en des tubes ou récipients, munis d'un collecteur qui maintient la concentration du polluant à l'intérieur de l'appareil à un niveau très faible ou nul. Selon sa structure moléculaire, le polluant diffuse dans le collecteur à une vitesse déterminée par sa concentration dans le milieu.

Des échantillonneurs passifs existent pour des polluants atmosphériques très divers, y compris l'anhydride sulfureux (35), l'oxyde de carbone (36), le benzène (37) et le peroxyde d'azote (36). En principe, il est possible de contrôler ainsi tout gaz pour lequel existe un matériau absorbant sélectif et efficace. On peut aussi se servir d'absorbants non spécifiques, comme le charbon de bois activé, puis différencier les gaz absorbés par chromatographie en phase gazeuse (9, 38, 39).

Les concentrations de pollen dans l'air se mesurent couramment par comptage du pollen recueilli sur une surface collante au moyen de méthodes classiques. Le radon peut se mesurer en espace clos à l'aide de collecteurs passifs (40). Les appareils à accumulation se distinguent tous par le fait qu'en présence de faibles concentrations dans le milieu, il faut prolonger la durée du prélèvement pour en assurer la précision. L'accumulation s'étend sur des jours, des semaines ou des mois; on ne la limite en général à quelques heures qu'en présence de fortes concentrations ambiantes.

Surveillance continue en temps réel. La concentration de nombreux polluants de l'air des locaux fermés varie énormément dans le temps et dans l'espace. La surveillance continue en temps réel permet d'enregistrer soit les concentrations instantanées, soit les concentrations moyennes sur courte période. Ce système offre des avantages évidents lorsque les concentrations de crête sont élevées, ou bien lorsque la puissance des sources ou les taux d'infiltration varient dans le temps, mais il s'assortit aussi de nombreux inconvénients. Le matériel consomme beaucoup d'énergie électrique, il est encombrant et coûteux, et il exige de nombreuses manipulations. Pour l'étude de la qualité de l'air en espace clos, on le place souvent dans un laboratoire mobile qui aspire des échantillons d'air dans l'espace considéré. L'entretien, le réglage et le calibrage des appareils, ainsi que la lecture des relevés, imposent beaucoup de travail. Comme la surveillance continue exige de la compétence et du soin, qu'elle est encombrante et coûteuse, elle ne sert en général qu'à la recherche. Il existe des appareils normalisés pour un grand nombre de gaz et pour les particules en suspension.

Contrôle de l'exposition des personnes et des groupes de population

Comme il est admis de plus en plus que les concentrations de polluants de l'air varient souvent énormément dans l'espace et dans le temps, et que les individus passent fréquemment 80 à 90% de leurs journées dans des locaux fermés, il faut connaître l'exposition totale des individus et des groupes de population aux divers polluants de l'air afin d'évaluer les effets nocifs de ces polluants sur leur santé. L'étude épidémiologique de ces effets devrait, dans l'idéal, partir de l'exposition totale des personnes, mais cela n'est pas toujours possible dans la pratique, et la surveillance passive des sujets constitue souvent le seul moyen de connaître cette exposition.

De plus, tout effort de réduction des expositions nécessite une surveillance des espaces occupés par des personnes et qui contiennent la plupart des sources de polluants de l'air de ces espaces. On peut aussi estimer la concentration des polluants au moyen de modèles de ces espaces, construits à partir de certaines caractéristiques de leur structure et de leur contenu, ainsi que de la nature des activités qui s'y déroulent.

En fait, il faudra représenter la plupart des espaces par des modèles, vérifier les hypothèses retenues moyennant une surveillance passive d'un certain nombre de ces espaces, puis les confirmer grâce à une surveillance continue en temps réel d'un nombre d'espaces encore plus réduit.

Les emplois du temps déclarés par un certain nombre de personnes appartenant à un groupe de population étudié peuvent servir pour vérifier la validité des indications sur les emplois du temps extraites d'autres études (41).

Surveillance biologique

Il est possible de mesurer les concentrations de certains polluants, ainsi que l'exposition qui en résulte pour l'être humain, en connaissant leur teneur dans le sang, l'urine ou le système pileux. On peut ainsi évaluer efficacement l'exposition aux métaux lourds comme le plomb ou le mercure. L'exposition au CO peut s'évaluer en déterminant la teneur du sang en carboxyhémoglobine, ou celle de l'air expiré en CO. Dans bien des cas où des odeurs sont répandues dans l'atmosphère, le seul moyen d'évaluer la pollution consiste à effectuer des mesures psychophysiques sur des observateurs humains (42, 43).

EVALUATION DES EFFETS DE LA POLLUTION DES LOCAUX SUR LA SANTE

Les méthodes d'évaluation des effets nocifs des polluants sur la santé varient selon les caractéristiques du polluant et la nature de l'effet. On connaît parfois la relation exposition/réaction, mais non la population exposée (au CO par exemple). D'autres fois, les effets sont eux aussi mal connus (par exemple ceux de la plupart des substances organiques volatiles). En général, il faut d'abord typer chimiquement les polluants dont on connaît mal les caractéristiques et les effets, puis en étudier la toxicologie, avant d'essayer d'en évaluer les effets sur la santé. S'il s'agit de polluants déjà typés, mais en association chimique, il faudra peut-être approfondir leur étude toxicologique pour connaître les mécanismes et les interactions de leurs effets et estimer les relations exposition/effet (c'est la cas par exemple des composants organiques de la fumée de tabac). Certains polluants sont, quant à eux, bien typés, mais, pour autant qu'on sache, ils ne se présentent en concentrations suffisantes pour en permettre l'étude que sur les lieux de travail (par exemple l'asbeste, certaines fibres minérales et certaines substances organiques volatiles); c'est sur les lieux de travail qu'il est alors plus facile d'en étudier les effets nocifs sur la santé.

Si l'on veut mieux connaître la relation entre l'exposition et la réaction en cas d'effets immédiats, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer des études contrôlées d'exposition d'êtres humains (par exemple pour les substances organiques odorantes ou le NO₂). S'il faut en savoir plus sur les effets nocifs chroniques ou différés, notamment pour chiffrer le rapport exposition/réaction, la méthode la plus pratique et la plus efficace consiste à réaliser des études épidémiologiques cas par cas comme cela se fait pour déterminer les effets à long terme des formaldéhydes. Les enquêtes descriptives constituent souvent le meilleur moyen de se faire une première idée des groupes de population exposés à différentes quantités d'un polluant donné et des effets que ce polluant produit dans un environnement complexe et mal connu (les «bâtiments malades» par exemple). Pour quantifier les effets nocifs des polluants dans des groupes de population, il faut recourir à des techniques épidémiologiques plus compliquées et plus coûteuses qui permettent de mesurer les interactions et d'essayer de déceler les variables perturbatrices. En général, ces études prennent beaucoup plus de temps que les autres.

Etudes toxicologiques sur l'animal

On ne sait pas grand-chose de la plupart des substances organiques volatiles de nature complexe qui émanent des dissolvants, des produits de nettoyage ou d'entretien, ainsi que de la fumée du tabac ambiante; il faut donc commencer par en étudier la toxicologie (44). Il se pourrait que les fibres minérales synthétiques produisent des effets nocifs jusqu'ici inconnus et qu'il faille alors en approfondir l'étude toxicologique sur une à trois espèces d'animaux, dans des conditions d'exposition aiguë et chronique à des concentrations très diverses et en employant des techniques d'évaluation biochimique et pathologique.

Etudes en milieu professionnel

Certains polluants sont bien typés, mais se rencontrent surtout sur les lieux de travail, où il faut effectuer d'autres études pour en mieux définir les effets et les relations exposition/effet.

La plupart des études sur l'asbeste ont été réalisées en milieu professionnel, mais on peut aussi en effectuer dans la population ou avec le concours des registres du cancer, par suivi de cas, s'il est possible de mesurer convenablement les expositions. De même, il peut se révéler nécessaire d'étudier de cette façon des polluants tels que les fibres minérales synthétiques ou certaines substances organiques volatiles (par exemple le toluène et les formaldéhydes), typés et repérés en milieu professionnel. Ce sont les observations des effets des produits de filiation du radon sur les mineurs d'uranium et d'autres métaux radioactifs qui ont apporté la plupart

des indications concernant les relations exposition/effet de ces produits, mais seulement à relativement hautes doses et en présence de fortes concentrations d'autres polluants tels que les poussières ou les combustibles Diesel. L'étude épidémiologique des effets des produits de filiation du radon sur la population en général ne semblerait mériter qu'une modeste priorité, considérant la faible probabilité d'en tirer des résultats significatifs.

Etudes par exposition contrôlée d'êtres humains

On connaît encore mal, dans le cas de certains polluants cependant bien typés, les relations exposition ponctuelle/réaction chez l'être humain. Il faut donc encore étudier les expositions ponctuelles, dans des conditions contrôlées, au NO₂ à diverses doses et dans différentes circonstances chez des sujets qui peuvent se caractériser par des sensibilités différentes (par exemple les asthmatiques et les sujets souffrant de dermatites allergiques). C'est en recourant aux expositions contrôlées, souvent combinées avec des enquêtes descriptives et des évaluations psychophysiques, qu'on étudie le mieux les polluants odorants (42, 43).

Etudes séquentielles

Il existe une séquence donnée pour l'étude des substances cancérigènes, qui débute d'ordinaire par des études de la mutagenèse dans les cultures cellulaires, suivies par d'autres études prolongées de la carcinogenèse et de la mutagenèse chez l'animal, puis éventuellement d'études de sujets en milieu professionnel ou d'études de cas. Si l'on veut obtenir des données plus complètes, on y ajoute souvent des études épidémiologiques de groupes de population. Les études de la tératogenèse peuvent procéder de façon similaire.

Il existe également une séquence des études des «bâtiments malades». Après avoir évalué les expositions et dressé des bilans de santé, on analyse les schémas répétitifs pour en tirer des hypothèses sur les éventuelles relations exposition/réaction, qui seront vérifiées d'autre part, y compris en laboratoire. L'étude des substances odorantes peut adopter une démarche séquentielle similaire :

- a) état descriptif des symptômes, analyse des plaintes des occupants (dans le cadre d'un système d'alerte);
- b) mise en évidence des associations entre les symptômes et les composantes évidentes de l'environnement;
- c) formulation d'hypothèses sur les relations exposition/réaction;

- d) vérification des hypothèses au moyen d'études contrôlées :
 - sur l'animal
 - sur l'être humain
- e) confirmation des constatations, en laboratoire et sur le terrain;
- f) recherche de l'étiologie :
 - sur modèles animaux
 - par d'autres moyens.

Les méthodes d'évaluation des effets spécifiques sur la santé sont choisies en fonction de ces effets eux-mêmes, et on les a abondamment étudiées, de même que leur qualité (45). Il s'agit d'enquêtes par questionnaire, de contrôles des fonctions, de biotests et de la surveillance biologique. On a aussi constaté récemment l'efficacité des méthodes cliniques et psychophysiques pour l'étude des polluants de l'air des locaux fermés.

Etudes épidémiologiques

Plusieurs facteurs conditionnent l'adéquation des méthodes épidémiologiques à l'étude de la relation entre un polluant et ses effets nocifs sur la santé. Grâce aux connaissances apportées par l'étude des polluants isolés de l'environnement et à des expériences de toxicologie, il est possible de se faire une idée des informations que pourrait procurer l'étude de populations; tout dépend cependant de ce qu'on attend des études et de la manière dont on veut en utiliser les résultats. C'est ainsi que certaines pourront revêtir un caractère descriptif, pour faire connaître les effets potentiels de certains types de polluants sur la population exposée, et que d'autres pourront viser à chiffrer la relation dose/réaction entre un polluant et ses effets nocifs sur la santé. Dans ce dernier cas, il faudra veiller à mesurer avec précision l'exposition et les effets, sans confondre ces derniers avec les effets d'autres composantes de l'état de santé.

Il faut tenir présents à l'esprit les points suivants :

1. Le choix des méthodes de mesure du polluant. Certaines, par exemple, sont inconfortables à appliquer ou trop coûteuses à utiliser pour des enquêtes à grande échelle.
2. La répartition du polluant dans le temps et dans l'espace. Comme on ne peut pas procéder indéfiniment à des mesures aux fins des grandes enquêtes, l'évaluation précise des expositions risque de se révéler impossible.

Cela peut conduire à des erreurs systématiques ou aléatoires, de nature à dévaluer les résultats de l'étude épidémiologique.

3. L'existence ou non de méthodes de mesure de l'effet nocif à étudier. Il arrive qu'il n'existe pas de méthodes commodes pour les enquêtes de vaste portée, ou bien que certaines méthodes ou techniques de mesure ne conviennent pas si l'on a affaire à certains groupes de population, les enfants par exemple.

4. La fréquence des effets sur la santé. Lorsqu'elle est faible, par exemple, il faut utiliser un large échantillon si le polluant a peu d'effets sur la santé ou s'il n'affecte qu'un faible pourcentage de la population.

5. Le décalage escompté entre l'exposition et l'effet. Ainsi, les effets cancérigènes n'apparaissent que plusieurs années après l'exposition.

6. L'interaction entre les polluants et d'autres facteurs tels que les caractéristiques socio-économiques du foyer, la fumée du tabac et les expositions en milieu professionnel, qu'il n'est pas toujours facile de mettre en évidence dans les études de populations.

Il importe de tenir compte des points ci-dessus dans la conception des études épidémiologiques futures des effets des polluants de l'air des locaux fermés. On peut réduire considérablement la taille de l'échantillon en choisissant des sujets de grande sensibilité ou vulnérabilité, qui ont subi de fortes expositions connues, et des témoins qui présentent les mêmes caractéristiques mais n'ont pas été exposés. Cela permet de connaître bien mieux les expositions, et partant d'accroître la valeur de l'étude. Ce qu'on pourrait appeler un «échantillonnage par paliers» conviendrait donc peut-être particulièrement pour les études épidémiologiques de l'effet des polluants de l'air des locaux fermés. Pour le réaliser, on procède aux premières estimations des expositions à la pollution de l'air de ces locaux au moyen d'un modèle simplifié d'un grand nombre de logements contenus dans un échantillon représentatif d'un univers encore plus vaste. Si on caractérise la population de chacun de ces logements en fonction de sa démographie, des sources de pollution et de son profil sanitaire simple, il devient possible d'étudier de petites cohortes soumises à des expositions particulières, ainsi que les témoins voulus, par des méthodes prospectives ou en coupe ponctuelle. Ces études de petits échantillons sont bien souvent plus précises que celles effectuées sur l'échantillon initial beaucoup plus fourni, où les expositions et les vulnérabilités accusent des variations aléatoires beaucoup plus marquées.

CONNAISSANCE DES EXPOSITIONS ET DE LEURS EFFETS SUR LA SANTE

Dans un premier temps, le groupe a dressé la liste des polluants de l'air des espaces clos, simples ou en combinaison, qu'il souhaitait étudier, sans les ranger pour autant par ordre d'importance. Il a ainsi retenu : la fumée du tabac (inhalation passive), le NO₂, le CO, le radon, les formaldéhydes, le SO₂, le CO₂, l'ozone, l'asbeste, les autres fibres minérales, les substances organiques et les allergènes (tableau 1). Dans son évaluation de ce que l'on sait des expositions, le groupe a distingué, pour ce qui concerne chaque polluant, d'une part la fraction de la population exposée à des concentrations minimales ou faibles, d'autre part celle qui est exposée à des concentrations suffisamment fortes pour constituer un problème de santé publique, et il a essayé de savoir dans quels types d'espaces se produisaient les expositions en question. Tous ces polluants sont présents dans les habitations, et la plupart d'entre eux dans les bureaux, les écoles et d'autres bâtiments publics. On trouve du CO dans les voitures et de l'ozone dans les avions, ainsi que du CO et du NO₂ dans les patinoires fermées lorsqu'on y utilise des glaces à essence. Les substances organiques et les allergènes se manifestent surtout dans les hôpitaux. En outre, le groupe a fait le point de ce que l'on savait des sources de polluants de l'air des espaces clos, de leur répartition, et des caractéristiques de leur évacuation, y compris la ventilation. Il s'est aussi attaché à déterminer l'adéquation des instruments et les expositions humaines qui sont connues grâce à la surveillance des concentrations dans l'air des locaux fermés et à celle des expositions individuelles.

Le tableau 1 présente le consensus du groupe sur ces points. Les fractions de la population exposées à des concentrations plus ou moins fortes de polluants sont qualifiées de la façon suivante : «peu» indique que la fraction estimée se situe au-dessous de 10%, «quelques-uns» qu'elle est comprise entre 10 et 50%, et «la plupart» qu'elle dépasse 50%. Le groupe a également pensé aux expositions aux agents infectieux, mais il a décidé de les laisser de côté car ces agents diffèrent à beaucoup d'égards des autres polluants. Il a, bien sûr, reconnu cependant que la ventilation et le renouvellement de l'air déterminent largement la concentration et la diffusion, dans les bâtiments, des agents infectieux véhiculés par l'air. Il a jugé que les instruments existants étaient en général capables de mesurer les concentrations de polluants en espace clos, sauf peut-être dans le cas des fractions organiques et gazeuses de la fumée du tabac, des fibres minérales, des substances organiques et des allergènes. Beaucoup d'instruments sont cependant coûteux, ce qui en limite l'utilité pour l'estimation des expositions humaines en général. Le groupe a considéré que, dans l'ensemble, les informations apportées par la surveillance des concentrations en espace

**Tableau 1. Connaissance actuelle
des expositions des populations**

Polluants	Sujets peu exposés	Sujets très exposés	Sources	Répar- tition	Instru- ments	Surveillance de l'air des locaux fermés/ des expositions individuelles
Fumée de tabac (inhalation passive)	la plupart	quelques- uns	+	±	± ^a	±
NO ₂	quelques- uns	quelques- uns	±	0	+	±
CO	la plupart	peu	±	0	+	±
Radon et produits de filiation	la plupart	peu	±	0	+	0
Formal- déhydes	la plupart	peu	±	±	+	±
SO ₂	peu	peu	±	±	+	0
CO ₂	la plupart	peu	+	±	+	+
Ozone	peu	peu	±	+	+	±
Asbeste	peu	peu	0	0	±	0
Fibres minérales	peu	peu	0	0	±	0
Substances organiques	la plupart	quelques- uns	±	0	±	0
Allergènes	la plupart	quelques- uns	0	0	±	+

^a Particules respirables

+ = suffisant

± = plus ou moins

0 = insuffisant

clos et des expositions individuelles étaient à la limite du valable ou insuffisantes, tandis que, bien souvent, le repérage des sources de polluants, comme la quantification de leurs émissions et de leur puissance, donnaient des résultats allant du marginal au suffisant. Par contre, on connaît beaucoup moins bien leur répartition, de sorte qu'il est difficile de se renseigner sur les expositions humaines à partir des informations quelque peu meilleures dont on dispose au sujet des sources.

Le groupe a ensuite fait le point de ce que l'on savait des relations exposition/réaction (tableau 2). A partir des informations sur les populations exposées aux polluants de l'air des locaux fermés, et notamment sur la répartition de ces expositions, il a déterminé la mesure dans laquelle on pouvait estimer le degré d'exposition de certains groupes particuliers comme les jeunes enfants, les personnes âgées et les sujets atteints de troubles cardiorespiratoires chroniques. Le tableau 2 montre que la répartition des expositions dans la population a été jugée mal connue, ou à peine dans le cas de quelques polluants provenant de sources surtout extérieures, par exemple l'ozone et le SO₂. La fumée du tabac se caractérise par son ubiquité et le groupe a considéré qu'on en connaissait plus ou moins bien la répartition. Les participants se sont déclarés unanimement d'accord sur la nature des effets nocifs pour la santé attendus de chaque polluant, ou soupçonnés d'être associés à sa présence. Il importe beaucoup de connaître la relation exposition/réaction pour évaluer les effets des polluants sur la santé, mais le groupe a estimé que cette condition n'était qu'assez rarement remplie. Il lui a semblé que les relations typiques exposition/réaction étaient mieux comprises lorsqu'on avait affaire à des réactions immédiates, mais beaucoup moins dans le cas des effets cancérigènes ou généraux. En raison de la nature même des expositions chroniques et des effets différés, il est impossible de mettre en évidence les relations exposition/réaction par des expositions contrôlées d'êtres humains, et d'autre part il existe peu d'informations épidémiologiques. Le groupe n'a pas pu étudier efficacement le cas des polluants organiques, en raison de la diversité des substances chimiques en cause et de celle des réactions spécifiques qu'elles provoquent. Après identification d'une substance chimique, il suffit souvent de consulter la documentation sur la médecine du travail pour trouver des données concernant les réactions, qui serviront à une première évaluation, mais il n'est d'ordinaire pas possible d'évaluer les effets cumulés ou synergiques des combinaisons de ces substances. Le groupe s'est également intéressé aux moyens qui existent et qui conviennent pour combattre chacun des polluants, qu'il s'agisse de techniques, de règlements, d'interventions sociales, d'éducation ou de prévention médicale.

Les tableaux 1 et 2 montrent clairement que le groupe a jugé que les connaissances actuelles ne suffisaient pas aux fins de l'estimation de l'impact des polluants sur une population. Les types de sources et les problèmes de santé publique diffèrent nettement d'un pays à l'autre. Comme les

chauffe-eau à allumage instantané au gaz et sans conduits d'évacuation sont très répandus aux Pays-Bas (46), on s'intéresse naturellement aux expositions de la population de ce pays au CO et au NO₂ en particulier. Dans les pays scandinaves, où les appareils de combustion sans conduits d'évacuation sont rares ou interdits, mais où les bâtiments sont mieux isolés et où les sols émettent plus de radon, on s'inquiète davantage des expositions à ce gaz et à ses produits de filiation ainsi qu'aux formaldéhydes et autres substances organiques qui proviennent des matériaux de construction, du mobilier et des articles de consommation. Il se peut qu'ailleurs le souci principal porte sur les concentrations en espace clos de polluants provenant de l'extérieur, ou sur les émissions dans l'air des locaux fermés de substances organiques résultant de l'emploi d'articles de consommation. Le groupe a observé que, selon les régions, les priorités différaient en fonction du climat, des caractéristiques de construction, des types de combustibles utilisés et des concentrations de polluants dans l'air extérieur.

Il est encore très difficile d'estimer l'impact total des polluants sur la santé publique, mais le groupe s'est déclaré unanimement d'accord sur les concentrations en deçà desquelles le risque serait minime et sur celles au-delà desquelles le risque suffit pour appeler des mesures correctives. Ces estimations figurent au tableau 3, ainsi que les concentrations relevées dans des locaux clos non professionnels. A noter qu'il s'agit là d'estimations qui s'appuient sur les connaissances actuelles et qu'il faudra peut-être les réviser au vu de nouvelles informations. En outre, il convient de préciser que tous les polluants gazeux ont été considérés isolément et non en association avec d'autres substances contaminantes.

Au sujet des concentrations, le groupe a débattu des problèmes généraux que pose l'application aux locaux non professionnels de la masse considérable d'observations apportées par la recherche, de directives et de normes concernant l'environnement extérieur et les locaux professionnels. Une application indiscriminée conduirait sans nul doute à de sérieuses difficultés. Les concentrations à l'intérieur des locaux sont tantôt plus fortes, tantôt plus faibles, que les concentrations extérieures, selon l'origine du polluant et la présence ou non de moyens d'évacuation et de sources intérieures. Leur profil dans le temps peut varier : dans le cas des polluants provenant de l'extérieur, les concentrations à l'intérieur se forment avec un certain décalage et leurs crêtes sont plus basses que celles des concentrations extérieures. Au contraire, avec les sources intérieures, ces crêtes peuvent dépasser de beaucoup celles qui sont observées à l'extérieur. Les expositions professionnelles durent moins que les expositions dans les locaux non professionnels, et les populations particulièrement sensibles ne les subissent généralement pas; à l'inverse, il arrive que les occupants les plus vulnérables de locaux fermés y passent près de 100% de leur temps. A l'extérieur, les polluants atmosphériques «indicateurs», par exemple le SO₂,

**Tableau 2. Connaissances actuelles
concernant les relations exposition/réaction**

Polluants	Sujets peu exposés	Sujets très exposés	Popu- lation exposée	Effets indé- sirables	Relation exposition/ réaction	Moyens de lutte
Fumée du tabac (inhalation passive)	la plupart	quelques- uns	±	irritation odeur respiratoires cancérogènes généraux	± ± ± 0 0	réglementaires techniques sociaux éducation
NO₂	quelques- uns	quelques- uns	0	respiratoires odeur généraux	0 ± 0	techniques réglementaires éducation
CO	la plupart	peu	0	généraux	+	techniques, réglementaires
Radon et produits de filiation	la plupart	peu	0	cancérogènes	±	techniques, réglementaires
Formal- déhydes	la plupart	peu	0	irritation odeur respiratoires cancérogènes généraux	± ± ± 0 0	techniques réglementaires
SO₂	peu	peu	±	respiratoires	0	techniques, réglementaires
CO₂	la plupart	peu	0	généraux	±	techniques
Ozone	peu	peu	±	irritation respiratoires odeur généraux	+ ± + 0	techniques (en espace clos)
Asbeste	peu	peu	0	maladies respiratoires cancérogènes	± ±	techniques réglementaires
Fibres minérales	peu	peu	0	respiratoires irritation	± ±	

Tableau 2 (suite)

Polluants	Sujets peu exposés	Sujets très exposés	Population exposée	Effets indésirables	Relation exposition/réaction	Moyens de lutte
Substances organiques	la plupart	quelques-uns	0	odeur irritation généraux respiratoires cancérigènes	0 0 0 0	techniques réglementaires éducation
Allergènes	la plupart	quelques-uns	0	respiratoires odeur irritation	± ± ±	sociaux réglementaires médicaux ^a

^a Les mesures médicales sont *préventives*

+ = suffisant
± = plus ou moins
0 = insuffisant

peuvent se résorber en partie, par transformation en sulfates ou précipitation sous forme d'acides, phénomène qui ne se produit guère dans les environnements clos.

LE SYNDROME DES «BATIMENTS MALADES»

On s'est aperçu de l'existence de «bâtiments malades» avant 1960, et on a enregistré depuis, et notamment ces six dernières années, un nombre croissant de cas dans plusieurs pays.

Symptômes

Les symptômes signalés, surtout dans les pays scandinaves et aux Etats-Unis, couvrent un large spectre mais comportent de nombreuses caractéristiques communes, par exemple :

- irritation des yeux, du nez et de la gorge
- sensation de sécheresse des muqueuses et de la peau
- érythème

Tableau 3. Consensus sur les concentrations de polluants de l'air des espaces clos
au vu des connaissances de 1982

Polluants ^a	Concentrations ^b observées	Concentrations ^b à risque limité ou nul	Concentrations ^b inquiétantes	Observations
Fumée de tabac (inhalation passive)	0,1 - 1 particules respirables	≈ 0	— ^c	Norme japonaise 0,15 mg/m ³
NO ₂	0,05 - 1	< 0,19	> 0,32	Selon OMS CSE 4 (47), 99,9%
CO	1 - 100	< 11 (2% COHb)	> 30 (3% COHb)	Exposition continue
Radon et produits de filiation ^d	4 - 8 000 Bq/m ³	≈ 0	> 70 Bq/m ³	Norme suédoise concernant les habitations nouvelles
Formaldéhydes	0,06 - 1,3	< 0,06	> 0,12	Expositions courtes ou prolongées
SO ₂	0,02 - 1	< 0,5	> 1,35	SO ₂ , seul, courte durée ^e
CO ₂	600 - 9 000	< 4 500	> 12 000	Norme japonaise 1 800 mg/m ³
Ozone	0,04 - 0,4	< 0,12	> 0,15	OMS CSE 7 (46)
Asbeste	< 10 ⁶ fibres/m ³	≈ 0	> 10 ⁵ fibres/m ³	Expositions prolongées
Fibres minérales	—	— ^c	— ^c	
Substances organiques	—	— ^c	— ^c	

^a Tous les gaz ont été considérés seuls, et non en association avec d'autres contaminants.

^b Concentrations en mg/m³ sauf indication contraire.

^c En raison de la nature complexe de ces polluants, on ne peut proposer aucune concentration significative.

^d 1 Bq/m³ = 0,027 nCi/m³.

^e Il n'a pas été tenu compte que des effets sur courte période du SO₂, seul, sans particules, ni sulfates, ni NO_x, qui peuvent se présenter en même temps que lui et constituent vraisemblablement alors le facteur critique. Dans le cas des expositions prolongées, les normes ou directives concernant la qualité de l'air extérieur offrent une meilleure marge de sécurité.

- fatigue mentale
- céphalées, fréquence élevée d'infections des voies respiratoires et toux
- enrrouement, respiration sifflante, démangeaisons et hypersensibilité non spécifique
- nausées, vertiges.

Les symptômes ci-dessus sont fréquents dans tout groupe de population, aussi est-il malaisé de les associer aux environnements clos dans tel ou tel cas pris isolément.

Pourtant, il existe à l'heure actuelle tellement de cas signalés de symptômes similaires qu'il est permis de croire que l'on se trouve en présence d'un véritable problème de santé dû à l'environnement, souvent baptisé le «syndrome des bâtiments malades».

Fréquence

Une enquête nationale effectuée au Danemark auprès de 1500 citoyens âgés de 15 à 67 ans a permis de constater que 15 à 30% d'entre eux présentaient des symptômes du type décrit ci-dessus (chez eux et au travail).

A Stockholm, les occupants de 110 écoles maternelles (sur un total de 1800) se sont plaints de symptômes similaires. Les résultats d'une enquête effectuée en Suède par le syndicat des enseignants révèlent que 40% des écoles, écoles maternelles et établissements semblables construits depuis 1976 connaissent des problèmes de climat intérieur qui s'apparentent au syndrome des «bâtiments malades».

Caractéristiques communes des «bâtiments malades»

Il faut distinguer là une première catégorie, celle des bâtiments dits «temporairement malades», qui comprend les bâtiments récents ou restaurés depuis peu, où les symptômes diminuent avec le temps et disparaissent pour la plupart au bout d'environ six mois. Il se peut que cette disparition tienne à l'évaporation des composés volatils contenus dans les matériaux de construction, peintures, etc.

Dans la seconde catégorie, celle des bâtiments «définitivement malades», les symptômes persistent durant des années et parfois résistent même à des mesures correctives poussées. Normalement, on ne trouve pas de cause évidente dans les bâtiments de cette catégorie, même après étude approfondie de la composition de l'air, du fonctionnement du système de ventilation et de la structure même du bâtiment. Il apparaît toutefois que ces bâtiments possèdent des caractéristiques communes :

1. Ils ont presque toujours un système de ventilation forcée, qui dessert en général tout le bâtiment ou une bonne partie des locaux qui le

composent, et qui fonctionne selon le principe de la recirculation partielle de l'air. Certains ont des prises d'air mal placées, tandis que d'autres utilisent des échangeurs de chaleur qui remettent les polluants de l'air vicié dans le circuit d'aération.

2. Il s'agit souvent de constructions assez légères.

3. Les surfaces intérieures sont en grande partie couvertes de textiles, par exemple de moquettes, et d'autres caractéristiques d'agencement intérieur aboutissent à un rapport surface/volume élevé.

4. Ils ont un bon rendement énergétique, sont assez bien chauffés et présentent un environnement thermique homogène.

5. Ils se caractérisent par leur étanchéité à l'air (aux Etats-Unis par exemple, il arrive souvent que les fenêtres ne puissent pas s'ouvrir).

Causes suggérées du syndrome des «bâtiments malades»

Il faut souligner que notre connaissance des causes du syndrome des «bâtiments malades» demeure fragmentaire et qu'elle ne permet guère de recommander des mesures correctives.

Les facteurs thermiques jouent souvent un rôle, auquel cas il est recommandé d'analyser l'environnement thermique pour s'assurer que les températures et leurs gradients ne sont pas excessifs et que l'habillement des occupants ainsi que l'humidité et la vitesse de circulation de l'air conviennent.

En ce qui concerne les irritants véhiculés par l'air, il faut s'assurer de l'absence de formaldéhydes en concentrations nocives. A noter cependant que d'autres irritants, provenant par exemple des matériaux de construction et de revêtement, du mobilier ou de l'emploi d'articles de ménage ou de bricolage, peuvent provoquer des symptômes presque identiques à ceux que produisent les formaldéhydes. A l'heure actuelle, on en sait très peu au sujet des interactions entre irritants en faibles concentrations. Il se peut que les mélanges de certains composés en concentrations subliminales exercent un effet cumulatif ou synergique et provoquent des réactions sensorielles. Il peut se produire aussi des réactions chimiques qui transforment les composés moins irritants en des composés qui le sont davantage.

Il arrive que l'homogénéité thermique de l'environnement des espaces clos et celle de la qualité de l'air résultant de sa remise en circulation augmentent la probabilité de propagation, dans tout le bâtiment, de polluants de source localisée et celle d'une exposition prolongée de tous les occupants à ces polluants.

Les plaintes des occupants peuvent d'ailleurs aussi avoir des causes subjectives. Lors d'un sondage effectué dans un grand bâtiment administratif de Zagreb, les deux tiers des personnes interrogées se sont déclarées opposées à la climatisation pour des raisons surtout psychologiques (49).

Il est d'ordinaire impossible de trouver les sujets-témoins nécessaires pour établir la prévalence des plaintes dans une population comparable qui pourrait servir de référence, mais, dans un cas où on a pu le faire, on a constaté dans les deux bâtiments considérés la même prévalence des mêmes symptômes (50).

METHODOLOGIE ET PRIORITES DES ETUDES FUTURES

Il faudrait donner aux futures études des expositions les trois grands objectifs suivants :

1. Déterminer la répartition des expositions dans la population, de manière à pouvoir évaluer les expositions des divers groupes au risque.
2. Améliorer l'évaluation des effets sur la santé en mesurant les expositions individuelles des sujets étudiés.
3. Concevoir des stratégies correctives efficaces et en évaluer l'efficacité.

Comme on l'a déjà vu, les études de l'effet de la pollution de l'air des espaces clos sont souvent séquentielles. Elles débutent fréquemment par une sorte de prospection, consistant à choisir quelques espaces où l'on effectue sur place, selon une démarche préétablie, un certain nombre de mesures de la concentration des polluants. En général, on n'évalue pas alors les effets sur la santé, mais seulement les expositions. La deuxième étape consiste en une recherche plus systématique où, d'une part, on ajoute à des relevés plus complets sur place des mesures de la puissance des sources et de la capacité des moyens d'évacuation dans des locaux spécialement aménagés en laboratoire et, d'autre part, on mesure sur place les taux de renouvellement de l'air et les effets de l'activité humaine. Ces mesures permettent de construire un modèle prédictif, qui peut servir pour estimer les concentrations de polluants dans un espace donné si on connaît un petit nombre de caractéristiques de cet espace. Il faut s'assurer de la validité des modèles de ce type en effectuant des mesures dans plusieurs espaces, pour pouvoir les appliquer ensuite avec quelque fiabilité à de nombreux autres.

On peut enfin réaliser des études épidémiologiques pour parfaire les estimations des expositions, non seulement à un polluant mais à plusieurs polluants simultanément.

Parmi les nombreuses études d'expositions contrôlées d'êtres humains mettant en cause de nombreux polluants, il y en a encore très peu qui aient porté sur des sujets particulièrement sensibles ou atteints de troubles cardiorespiratoires. L'évaluation des expositions non professionnelles en espace clos devra se faire sur des groupes vulnérables de ce genre.

Il importe au premier chef, notamment lorsqu'il s'agit d'études sur le terrain où il faut effectuer beaucoup de mesures dans de nombreux emplacements, d'observer scrupuleusement un certain nombre de précautions. A des fins de comparaison et d'évaluation des mesures effectuées, il faut réunir des informations sur les points suivants :

- a) type, modèle et sensibilité des instruments utilisés;
- b) plan de l'expérience, comportant non seulement l'énoncé du programme quotidien, mais aussi un relevé des périodes d'observation;
- c) description détaillée des méthodes employées pour assurer et vérifier la qualité des mesures effectuées (voir dans 18, bibliographie, les programmes de mesures recommandées);
- d) indication de l'emplacement des lieux de prélèvement, assez détaillée pour permettre la répétition des mesures, notamment en présence de sources ponctuelles;
- e) période sur laquelle sont calculées les moyennes, durée des mesures, et formules d'agrégation des données;
- f) caractéristiques du bâtiment, vitesse de renouvellement de l'air, sources d'autres polluants, consommation de tabac par les occupants, et autres facteurs pertinents.

Il faudrait, en principe, disposer d'instruments pour la quasi-totalité des mesures, mais le groupe a reconnu que leur utilisation était, dans un certain nombre de cas, soit sans objet, soit trop coûteuse considérant l'envergure de l'opération. Les instruments sont cependant nécessaires dans les cas précis énumérés ci-après :

1. L'évaluation des expositions individuelles nécessite l'emploi d'un compteur portatif capable d'enregistrer la concentration de NO_2 soit en continu, soit à de courts intervalles réguliers. Il faut aussi disposer d'un appareil qui puisse évaluer l'exposition moyenne aux formaldéhydes sur 6 à 24 heures et l'exposition aux allergènes pendant de courtes périodes.

2. La surveillance des espaces nécessite l'emploi de compteurs passifs capables de fonctionner 24 heures et d'autres moyens de détection simples et peu onéreux. Il faut aussi recourir à des moyens plus simples, moins coûteux et moins encombrants pour mesurer la ventilation et les infiltrations d'air.

3. Le travail en laboratoire et les relevés détaillés sur le terrain nécessitent l'emploi d'instruments capables de détecter les acides et les composés réactifs organiques.

4. Il reste encore à perfectionner les méthodes de biotest et de surveillance biologique et à mettre au point des méthodes normalisées d'évaluation psychophysique des odeurs. Il existe en principe des procédés d'analyse des mélanges organo-chimiques complexes, mais les instruments actuels sont coûteux, complexes et souvent inaccessibles.

Le groupe a étudié les priorités à affecter aux divers polluants lors des futurs travaux d'évaluation des expositions, en fonction de l'importance relative de ces expositions et de ce que l'on peut faire actuellement pour les mesurer. Il a donné une haute priorité aux substances chimiques organiques, aux particules respirables en suspension, au NO₂ et aux allergènes, une priorité moyenne au CO, aux formaldéhydes, au radon et aux agents infectieux, enfin une moindre priorité au CO₂, à l'asbeste, aux autres fibres minérales, à l'ozone et au SO₂.

En ce qui concerne l'évaluation des effets nocifs sur la santé, le groupe a noté que, malgré les recherches épidémiologiques sur les effets cancérogènes éventuels de l'inhalation passive de fumée de tabac et sur sa relation avec les maladies des voies respiratoires, il restait encore incontestablement à faire dans ce domaine. Un certain nombre d'études épidémiologiques ont permis d'évaluer, au moyen quelquefois d'appareils portatifs, les expositions au NO₂ et l'impact de ce gaz sur les environnements clos (51). Comme cette démarche ne renseigne pas sur les crêtes de concentration du NO₂, qui jouent peut-être le rôle déterminant en l'occurrence, de nouvelles études s'imposent. Il faudra étudier les expositions contrôlées d'êtres humains au NO₂ seul pour observer les réactions immédiates à ces expositions.

Il faut mieux connaître la répartition des expositions humaines au radon et à ses produits de filiation, aux formaldéhydes, au SO₂, à l'ozone et au CO₂, pour s'assurer de la nécessité et de l'efficacité des études épidémiologiques. Il arrive que des études de cette nature ne soient pas faciles à réaliser, tantôt parce qu'il est malaisé de déterminer quelles sont la fourchette d'expositions et les méthodes de mesure qui conviennent, tantôt, comme dans le cas du radon, parce qu'un long délai s'écoule entre l'exposition et la réaction. On a déjà abondamment étudié les allergènes.

Au fur et à mesure que les études épidémiologiques des effets de la pollution des espaces clos deviendront plus complexes, il y aura avantage à

typer un grand nombre de bâtiments selon leurs caractéristiques structurales et leurs sources spécifiques de pollution ainsi que selon les caractéristiques de leurs occupants. En procédant ainsi, on pourra choisir un relativement petit nombre d'espaces et leurs occupants pour évaluer un effet particulier sur la santé. Ce processus de sélection permettra éventuellement d'exclure tels ou tels paramètres, ce qui accroîtra la précision de l'étude et en réduira le coût. On pourra enfin étudier successivement divers polluants à partir du même choix initial de bâtiments.

Le groupe a reconnu qu'il était nécessaire et souhaitable de créer, pour ce travail complexe, un comité d'orientation qui aurait pour mission de donner des avis et de coordonner, sur demande, les initiatives. Des suggestions concernant les objectifs, la composition et les modalités de fonctionnement de ce comité figurent à l'Annexe 2.

CONCLUSIONS

Le groupe est parvenu à plusieurs conclusions, largement acceptées, concernant l'estimation et la mesure des expositions à des polluants de l'air des espaces clos ainsi que la nature et l'ampleur de leurs effets nocifs sur la santé.

1. Les très nombreuses études de cas montrent que divers polluants de l'air, en fortes concentrations, provoquent des effets nocifs graves sur la santé, notamment des effets immédiats. On a moins de certitude concernant les effets différés d'une exposition chronique à des polluants de l'air des espaces clos en concentrations légèrement supérieures à la normale naturelle.

2. La qualité de l'air des espaces clos a fait l'objet de très nombreuses observations, mais on n'en sait encore pas assez sur les expositions humaines en général. Il faudra donc estimer ces expositions sur la base d'une description appropriée des caractéristiques des parcs immobiliers et des sources de pollution intérieures, homme compris, dont il faudra connaître pour cela la répartition combinée.

3. Le nombre des «bâtiments malades» signalés augmente. Il est souvent difficile, voire impossible, d'établir une relation entre les polluants de l'air de ces bâtiments et leurs effets prétendus sur la santé, car ces effets sont en général du type de ceux que l'on observe dans d'autres groupes de population similaires.

4. Les polluants de l'air des espaces clos se rencontrent aussi à l'air libre et dans les lieux de travail. Pour beaucoup d'entre eux, les autorités responsables

de la santé publique ou professionnelle ont élaboré et publié des critères sanitaires, des directives applicables aux concentrations, et même des normes de qualité de l'air ambiant. Le groupe en a étudié les possibilités d'application aux environnements clos et a conclu qu'elles étaient limitées. Le choix des valeurs retenues dans les directives et les normes repose sur un grand nombre de facteurs : fluctuation des concentrations dans le temps, mélanges de polluants, transformation des polluants dans l'atmosphère, etc., qui varient énormément selon les circonstances; aussi, les directives, critères et normes relatifs aux environnements professionnels, extérieurs et intérieurs respectivement peuvent-ils beaucoup différer les uns des autres (dans le cas du SO₂ par exemple).

5. De l'avis général des participants, les instruments de mesure de la qualité de l'air des espaces clos existent en principe, mais leur coût demeure souvent élevé. On n'est pas encore très à même d'analyser et de typer les mélanges complexes de substances chimiques organiques, et il n'existe pas à ce jour de moyens peu onéreux de les dissocier en leurs composants.

6. Les études épidémiologiques des effets nocifs des polluants de l'air extérieur sur la santé ne présentent sans doute guère d'utilité lorsqu'on veut évaluer l'impact, sur la santé, des expositions à la pollution des locaux fermés, car la plupart d'entre elles n'ont pas tenu compte de la façon dont l'environnement intérieur de ces locaux pourrait influencer sur ces expositions. Il est tout à fait probable que de nouvelles études, qui prendront en compte les environnements intérieurs, démontreront que des concentrations au sujet desquelles les résultats n'avaient guère été probants jusque-là peuvent exercer des effets non négligeables sur la santé.

7. On ne connaît pas suffisamment bien les expositions des populations ni la relation exposition/effet, ne fût-ce que pour estimer l'impact total sur la santé publique des expositions en espace clos à l'un quelconque des polluants considérés : fumée du tabac, NO₂, radon et produits de filiation, formaldéhydes, SO₂, CO₂, ozone, asbeste, fibres minérales, substances organiques et allergènes. Les lacunes les plus sérieuses concernent la répartition des sources de pollution, la relation exposition/réaction et les populations exposées. D'autre part, la surveillance des expositions n'a pas apporté d'informations suffisantes. On connaît mieux, par contre, les caractéristiques d'émission des sources, les instruments de mesure et la nature des effets nocifs à escompter.

RECOMMANDATIONS

Le groupe a formulé les recommandations ci-après :

1. Il conviendrait de réaliser une analyse critique des effets nocifs des formaldéhydes sur la santé, qui pourrait se conclure par des recommandations concernant les recherches à effectuer par la suite.
2. Il conviendrait, dans un premier temps, de déterminer quels sont les matériaux de construction et les articles d'ameublement à forte émission de substances toxiques, afin de les classer ensuite selon leurs effets nocifs sur la santé.
3. Il y aurait lieu de mesurer les concentrations de SO_2 et d'ozone dans les différentes parties des environnements clos, pour se renseigner sur les expositions totales à ces gaz et déterminer à nouveau les risques liés à leur présence.
4. Il conviendrait d'étudier conjointement les effets nocifs produits par le NO_2 , le CO et d'autres polluants en cas d'inhalation passive et de mauvaise combustion en espace clos.
5. Les substances organiques se caractérisent par leur ubiquité dans l'air des espaces clos, mais on sait très peu de choses sur les formes d'exposition à ces substances. Il faudrait en priorité recenser et quantifier ces substances dans les environnements clos.
6. Les expositions au radon et à ses produits de filiation dépendent pour beaucoup des quantités de radon émises par le sol, les eaux souterraines et les matériaux de construction. Il faudrait étudier en priorité la contribution de ces trois sources à la pollution dans diverses régions.
7. Il conviendrait d'inciter les consommateurs à utiliser les moyens techniques voulus pour combattre efficacement la pollution des locaux fermés par les produits de combustion. Il faudrait déconseiller, voire interdire, l'usage en intérieur d'appareils de combustion sans conduits d'évacuation. Sensibiliser l'opinion publique contribue efficacement à l'amélioration de la qualité de l'air des espaces clos.
8. Il est recommandé de réunir un groupe de travail qui serait chargé d'étudier les incidences des codes du bâtiment et du logement sur la qualité de l'air des locaux fermés et, le cas échéant, de faire des recommandations concernant l'inclusion dans ces codes de dispositions consacrées à la qualité de l'air en espace clos.

9. Il existe dans certains pays des registres qui contiennent des informations spécifiques sur les bâtiments, par exemple sur les matériaux employés, les systèmes de chauffage, la dimension des pièces, etc. Ces registres ont été constitués à d'autres fins, mais ils pourraient aussi servir à l'étude des effets des caractéristiques des bâtiments sur la santé de leurs occupants.

10. Aux fins d'enquêtes, le groupe recommande, pour presque tous les contaminants, l'usage de moniteurs passifs fonctionnant sur 24 heures, c'est-à-dire capables de mesurer l'accumulation des polluants en 24 heures. Il faudra aussi élaborer les questionnaires voulus pour obtenir des informations supplémentaires. Pour les enquêtes sur la qualité de l'air en espace clos, il faut un appareil simple et peu coûteux qui mesure le renouvellement de l'air, et le groupe recommande instamment sa mise au point.

11. Il conviendrait d'effectuer sur le terrain des études des polluants de l'air des espaces clos et des effets nocifs qui leur sont associés, en utilisant autant que possible des échantillons représentatifs de populations.

BIBLIOGRAPHIE

1. Fanger, P.O. & Valbjørn, O., ed. *Indoor climate effects on human comfort, performance and health*. Copenhagen, Institut danois de recherche sur le bâtiment, 1979.
2. *Problèmes de santé liés à la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : rapport sur la réunion d'un groupe de travail de l'OMS*. Copenhagen, OMS, Bureau régional de l'Europe, 1981 (Rapports et Etudes EURO, N° 21).
3. US National Academy of Sciences/National Research Council. *Report of the Committee on Indoor Pollutants*. Washington, DC, National Academy Press, 1981.
4. *Proceedings of the Symposium on Health Aspects of Indoor Air Pollution. Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 57 : 825-1084 (1981).
5. Aurand, K. et al., ed. *Luftqualität in Innenräumen*. Stuttgart, Gustav Fischer, 1982.
6. Indoor Air Pollution. Proceedings of the International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation. *Environment international*, 8(1-6) : 1-531 (1982).
7. Yocom, J.E. et al. *A study of indoor - outdoor air pollutant relationships*. Washington, DC, National Air Pollution Control Administration, 1974, Vol. 1.

8. **Moschandreas, D.J. et al.** *Indoor air pollution in the residential environment*. Gaithersburg, MD, US Environmental Protection Agency, 1978 (document EPA-600/7-78-229).
9. **Wallace, L. & Ott, W.** Personal monitors : a state of the art survey. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **32** : 601-610 (1982).
10. **Keller, M.D. et al.** Respiratory illness in households using gas and electricity for cooking. I. Survey of incidence. *Environmental research*, **19** : 495-503 (1979).
11. **Melia, R.J.W. et al.** Association between gas cooking and respiratory disease in children. *British medical journal*, **2** : 149-152 (1977).
12. **Letz, R.J. et al.** Pulmonary functions of children and indoor NO₂ concentrations in Portage, WI. *Indoor Air Pollution. International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, MA, 13-16 October 1981* (publication inédite).
13. **Bridge, D.P. & Corn, M.** Contribution to the assessment of exposure of non-smokers to air pollution from cigarette and cigar smoke in occupied spaces. *Environmental research*, **5** : 192-209 (1976).
14. **Drivas, P.J. et al.** Experimental characterization of ventilation systems in buildings. *Environmental science and technology*, **6** : 609-614 (1972).
15. **Jacobi, W.** Activity and potential d-energy of radon-222 and radon-222 daughters in different atmospheres. *Health physics*, **22** : 441-450 (1972).
16. **Berglund, B. et al.** The influence of ventilation on indoor/outdoor air contaminants in an office building. *Environment international*, **8**(1-6) : 395-400 (1982).
17. **Moschandreas, D.J. & Steck, J.W.C.** *The GEOMET indoor/outdoor air pollution model*. Gaithersburg, MD, US Environmental Protection Agency, 1978 (document EPA-600/7-78-106).
18. *Estimating human exposure to air pollutants*. Genève, Organisation mondiale de la santé, 1982 (OMS, Publication offset, N° 69).
19. **Leaderer, B.P.** Air pollutant emissions from kerosene space heaters. *Science*, **218**(4577) : 1113-1115 (1982).
20. **Mølhav, L. et al.** [*Emissions provenant des matériaux de construction*]. Copenhague, Institut danois de recherche sur le bâtiment, 1982 (rapport 137) (en danois, avec résumé en anglais).
21. **Leaderer, B.P. et al.** Ventilation requirements in buildings. 3. Particulate matter and carbon monoxide from cigarette smoking. *Atmospheric environment* (sous presse).
22. **Stranden, E. & Berteig, L.** Radon in dwellings and influencing factors. *Health physics*, **39** : 275-284 (1980).
23. **Castrén, O.** The contribution from bored wells to respiratory radon daughter exposure in Finland. *Natural radiation environment*, **3** : 1364-1370 (1978).
24. **Pickrell, J.A. & Griffis, L.C.** Formaldehyde release from formaldehyde-resin containing products : effect of conditioning at 100% relative

- humidity. *Indoor Air Pollution. International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, MA, 13-16 October 1981* (publication inédite).
25. Dietz, R.N. & Cote, E.A. Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer method. *Environment international*, **8**(1-6) : 419-434 (1982).
 26. Sherman, M.H. et al. *Air infiltration measurement techniques*. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley Laboratory, 1980 (document UCLBL-10705).
 27. Mattingly, G.D. & Peters, E.F. Wind and trees: air infiltration effects on energy in housing. *Journal of industrial aerodynamics*, **2** : 1-19 (1977).
 28. Bahnfleth, D.R. et al. Measurement of infiltration in two residences. Part I. Technique and measured infiltration. *ASHRAE transactions*, **63** : 439-452 (1957).
 29. Coblentz, C.W. & Achenbach, P.R. Field measurement of air infiltration in ten electrically heated houses. *ASHRAE transactions*, **69** : 358-365 (1963).
 30. Tamura, G.T. Measurement of air leakage characteristics of house enclosures. *ASHRAE transactions*, **81** : 201-211 (1975).
 31. Grot, R.A. & Clark, R.E. Air leakage characteristics and weatherization techniques for low income housing. In : *Proceedings of the Department of Energy/ASHRAE Conference on Thermal Performance of Internal Envelopes of Buildings, Orlando, FL, December 1979*. ASHRAE, Atlanta, GA, 1980.
 32. Wegner, J. The significance of air exchange for indoor air quality. In : Aurand, K. et al., ed. *Luftqualität in Innenräumen*. Stuttgart, Gustav Fischer, 1982.
 33. Lindall, T. & Mansson, L.G. *Minimum ventilation rates - biological demands*. Stockholm, Institut national de médecine de l'environnement, 1981 (rapport 4/81).
 34. Johansson, I. Determination of organic compounds in indoor air with potential reference to air quality. *Atmospheric environment*, **12** : 1371-1377 (1978).
 35. Palmes, E.D. & Gunnison, A.F. Personal monitoring device for gaseous contaminants. *Journal of the American Association of Industrial Hygiene*, **34** : 78-81 (1973).
 36. Palmes, E.D. *Personal samplers for CO, NO and CO₂ in air*. Washington, DC, US Bureau of Mines, 1977 (rapport 92-77).
 37. Bamberger, R.L. et al. A new personal monitor for organic vapors. *Journal of the American Association of Industrial Hygiene*, **39** : 701-708 (1978).
 38. Gillespie, J.C. & Daniel, L.B. A new sampling tool for monitoring exposure to toxic gases and vapors. In: *Proceedings of the Symposium on the Development and Use of Personal Monitors for Exposure and Health*

- Effects Studies. Washington, DC, US Environmental Protection Agency, 1979 (rapport EPA-600/9-79-032).
39. Seifert, B. & Abraham, H.J. Use of passive samplers for the determination of gaseous organic substances in indoor air at low concentration levels. *International journal of environmental and analytical chemistry*, 13 : 237-253 (1983).
 40. Fleischer, R.L. et al. Dosimetry of environmental radon: methods and theory for low-dose integrated measurements. *Health physics*, 39 : 957-962 (1980).
 41. Moschandreas, D.J. Exposure to pollutants and daily time budgets of people. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 57 : 845-859 (1981).
 42. Berglund, B. et al. Olfactory and chemical characterization of indoor air. Towards a psychophysical model for air quality. *Environment international*, 8(1-6) : 327-332 (1982).
 43. Cain, W.S. *Ventilation and odor control: prospects for energy efficiency*. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley Laboratory, 1981 (document UCLBL-4622602).
 44. *Principes et méthodes d'évaluation de la toxicité des produits chimiques. Partie I*. Genève, Organisation mondiale de la santé, 1978 (Critères d'hygiène de l'environnement, N° 6).
 45. *Guidelines on studies in environmental epidemiology*. Genève, Organisation mondiale de la santé (Critères d'hygiène de l'environnement) (sous presse).
 46. Brunekreef, B. et al. Indoor carbon monoxide pollution in the Netherlands. *Environment international*, 8(1-6) : 193-196 (1982).
 47. *Oxydes d'azote*. Genève, Organisation mondiale de la santé, 1977 (Critères d'hygiène de l'environnement, N° 4).
 48. *Oxydants photochimiques*. Genève, Organisation mondiale de la santé, 1979 (Critères d'hygiène de l'environnement, N° 7).
 49. Sverko, B. & Vulmirozić, Z. [Sondage d'opinion sur la climatisation dans les bâtiments administratifs]. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 30 : 323-332 (1979) (en serbo-croate, avec résumé en anglais).
 50. Levine, M.S. et al. An investigation of health concerns and environmental measurements in a large office building. *Indoor Air Pollution. International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, MA, 13-16 October 1981* (publication inédite).
 51. Florey, C. du V. et al. The epidemiology of indoor nitrogen dioxide. In: Aurand, K. et al., ed. *Luftqualität in Innenräumen*. Stuttgart, Gustav Fischer, 1982.

COMPOSITION DES SOUS-GROUPES

Sous-groupe 1 : Connaissance des expositions humaines

Dr Benarie	Dr Moschandreas
Dr Boleij	Dr Muylle
Dr de Koning	Dr Seifert
Dr Fugaš	Dr Spengler
Dr Knöppel	Dr Stranden

Sous-groupe 2 : Connaissance des effets nocifs sur la santé

Dr Andersen	Dr Melia
Dr Lebowitz	Dr Stolwijk
Dr Lindvall	

Sous-groupe 3 : Concentrations compromettant la qualité de l'air en espace clos

Dr Andersen	Dr Melia
Dr Lebowitz	Dr Stolwijk
Dr Lindvall	

Sous-groupe 4 : Etudes des normes existantes

Dr Spengler

Sous-groupe 5 : Comité international d'orientation des travaux sur la qualité de l'air en espace clos

Dr Moschandreas	Dr Suess
Dr de Koning	

Sous-groupe 6 : Evaluation des expositions et priorités

Dr Benarie	Dr Muylle
Dr Boleij	Dr Seifert
Dr Fugaš	Dr Spengler
Dr Knöppel	Dr Stranden
Dr Moschandreas	

Sous-groupe 7 : Le syndrome des «bâtiments malades»

Dr Andersen
Dr Lebowitz
Dr Lindvall

Dr Melia
Dr Stolwijk

Sous-groupe 8 : Concentrations de SO₂ et relations air intérieur/air extérieur

Dr Seifert

Dr Spengler

Sous-groupe 9 : Evaluation des effets sur la santé — méthodes et priorités

Dr Lebowitz

Dr Melia

COMITE D'ORIENTATION DES TRAVAUX SUR LA QUALITE DE L'AIR EN ESPACE CLOS

La communauté scientifique et les organismes réglementaires portent, depuis quelques années, un intérêt croissant aux travaux de recherche sur la qualité de l'air en espace clos (QAEC). Un certain nombre d'instituts de recherche effectuent d'autre part des travaux approfondis dans ce domaine. Quelques-uns de leurs experts ont assisté aux travaux du groupe chargé d'étudier la question de l'évaluation et de la surveillance de la QAEC, réuni du 8 au 11 juin 1982 par le Bureau régional de l'Europe de l'OMS à Nördlingen, République fédérale d'Allemagne.

Les participants à cette réunion ont insisté sur la nécessité de coordonner les travaux de recherche sur la QAEC et ont jugé qu'il serait utile et opportun de créer, à cet effet, un comité d'orientation. Pour les besoins de ce comité, l'expression «locaux fermés» ou «espaces clos» devrait s'entendre des environnements tels qu'habitations, écoles, bâtiments publics, véhicules et autres espaces clos auxquels le public a accès; il excluerait toutefois les environnements de travail dans l'industrie. Sachant que le Bureau régional souhaiterait que l'étude du problème de la QAEC acquière une dimension internationale, les participants lui ont demandé de créer ce comité et d'en assurer le secrétariat permanent.

Le groupe a défini comme suit les objectifs, la composition et les modalités de fonctionnement du comité.

Objectifs

1. Recenser et juger les activités de recherche et autres menées dans divers domaines au sujet de la qualité de l'air en espace clos, y compris sa surveillance, la mesure des expositions, ses effets sur la santé de l'être humain et son confort, les stratégies de lutte contre la pollution et les politiques officielles.
2. Participer à l'élaboration et à l'étude des critères de QAEC et de salubrité de l'environnement.
3. Encourager la coordination internationale des travaux de recherche afin d'éviter tout double emploi sans nécessité, en servant de point de rassemblement et de diffusion des informations nouvelles, avec le concours d'un centre collaborant approprié de l'OMS.

4. Agir, par l'intermédiaire de l'OMS, en qualité de consultant auprès des autorités nationales et organisations intergouvernementales au sujet des travaux de recherche particuliers à effectuer dans le domaine de la QAEC et donner sur demande des conseils pour l'élaboration de programmes de réglementation.
5. Signaler aux instituts de recherche les lacunes à combler.
6. Servir de comité consultatif pour les programmes scientifiques lors des congrès consacrés à la QAEC.

Composition

Le comité se composera de membres assez nombreux et compétents pour étudier les effets de la QAEC sur la santé, ainsi que ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

Il comprendra en tous temps, pour permettre son bon fonctionnement, au maximum 20 et au minimum 14 membres. Toutefois, il pourra décider, en cas de nécessité, de faire appel à titre temporaire à d'autres experts.

Modalités de fonctionnement

Pour atteindre les objectifs précités, le comité se réunira normalement au moins une fois l'an. Il pourra, s'il y a lieu, se voir confier à l'occasion d'autres tâches spécifiques. S'il se tient telle ou telle année un congrès international consacré à la QAEC, le comité se réunira de préférence immédiatement après ce congrès.

LISTE DES PARTICIPANTS

Conseillers temporaires

Dr I. Andersen, directeur général, Institut danois de santé du travail, Hellerup (Danemark)

Dr M. Benarie, département de la pollution atmosphérique, Institut national de recherche chimique appliquée, Brétigny (France)

Dr J.S.M. Boleij, professeur associé, département de la pollution, atmosphérique, Université d'agriculture, Wageningen (Pays-Bas)

Dr M. Fugaš, chef du laboratoire d'hygiène de l'environnement, Institut de la recherche médicale et de la santé du travail, Zagreb, Yougoslavie (*président*)

Dr M.D. Lebowitz, professeur de médecine interne, centre universitaire des sciences de la santé, faculté de médecine, Université d'Arizona, Tucson, AZ (Etats-Unis d'Amérique)

Dr T. Lindvall, professeur et directeur adjoint, Institut national de médecine de l'environnement, Stockholm (Suède)

Dr R.J.W. Melia, chargé de cours, département de médecine communautaire, St Thomas's Hospital Medical School, Londres (Royaume-Uni)

Dr D.J. Moschandreas, conseiller scientifique principal, division de recherches sur la chimie et les techniques de la chimie, IIT Research Institute, Chicago, IL (Etats-Unis d'Amérique)

Dr E. Muylle, assistant principal, section de la pollution atmosphérique, département de l'environnement, Institut d'hygiène et d'épidémiologie, Bruxelles (Belgique)

Dr B. Seifert, professeur et directeur, application des mesures de l'air ambiant à l'hygiène de l'environnement, Institut d'hygiène de l'eau, des sols et de l'air, Service fédéral de la santé, Berlin-Ouest (*vice-président*)

Dr J.D. Spengler, professeur associé, salubrité de l'environnement, école de santé publique, Université d'Harvard, Boston, MA (Etats-Unis d'Amérique)

Dr J.A.J. Stolwijk, professeur d'épidémiologie (salubrité de l'environnement), département d'épidémiologie et de santé publique, école de médecine de l'Université de Yale; directeur adjoint, J.B. Pierce Foundation Laboratory, New Haven, CT (Etats-Unis d'Amérique) (*rapporteur*)

Dr E. Stranden, physicien sanitaire, Institut national d'hygiène des rayonnements, Østeraos (Norvège)

Représentants d'autres organisations

Commission des Communautés européennes (CCE)

Dr H. Knöppel, chef du service des substances chimiques dans l'environnement, division chimie, Centre de recherches, Ispra, Italie

Organisation mondiale de la santé

Bureau régional de l'Europe

Dr M.J. Suess, fonctionnaire régional pour les risques liés à l'environnement (*secrétaire scientifique*)

Siège

Dr H. W. de Koning, spécialiste scientifique, pollution atmosphérique, dangers de l'environnement et protection des produits alimentaires, Division de la salubrité de l'environnement