

POLLUTION INTÉRIEURE DES LOCAUX

ÉTAT ACTUEL ET ORIENTATIONS DES ÉTUDES

par J.-C. Loewenstein (*) et B. Festy (**)



La pollution intérieure des locaux est caractérisée par l'existence de nombreux polluants extérieurs et intérieurs. La ventilation, le traitement de l'air et les facteurs climatiques posent des problèmes spécifiques et doivent faire l'objet d'une approche particulière. Cet article, que nous publions avec l'aimable autorisation de la revue « Pollution Atmosphérique », passe en revue les conséquences des polluants sur la santé et montre qu'il est possible de les maîtriser par trois approches complémentaires : actions à la source, ventilation et réglementation.

Le premier symposium OMS (1) sur le « climat intérieur » a eu lieu en 1978, il y a donc seulement une dizaine d'années. Un certain nombre d'études avaient déjà été réalisées auparavant dans divers pays, mais c'est surtout depuis 1973, date de « l'affaire du pétrole », que cette question prit une importance subite.

En effet, le renchérissement de l'énergie devait conduire, dans un souci d'économie, à renforcer considérablement les normes d'isolation des locaux et à réduire les taux de ventilation dans les immeubles climatisés.

C'est ainsi que les rares organismes et les non moins rares chercheurs qui avaient

Le plus gros des efforts de recherche sur la maîtrise de la pollution intérieure a été fait dans les pays les plus confrontés à des problèmes climatiques nécessitant isolation et climatisation comme les USA (photo M.L.).



(*) Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France — Département Environnement Aquatique et Atmosphérique

(**) Directeur du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris — Vice-Président de l'APPA.

(1) Organisation Mondiale de la Santé.

Figure 1. — SOURCES DE POLLUTION INTÉRIEURE

Origine extérieure : radon et descendants (soll), polluants extérieurs, polluants évaporés de l'eau d'alimentation.

Matériaux : matériaux de construction, revêtements (murs, tapis, moquettes...), meubles.

Combustion : tabagisme, chauffages, cuisinières et gazinières.

Êtres vivants (métabolisme) : êtres humains, animaux de compagnie, végétaux.

Activité et hygiène : cuisine (cuisson), nettoyage, systèmes de vide-ordures, bricolage, machines diverses.

Systèmes de traitement d'air (s'il y a lieu).

Figure 2. — PRINCIPAUX POLLUANTS INTÉRIEURS ET LEUR ORIGINE

Radon : sous-sol du logement, matériaux de construction, eau d'alimentation.

Gaz de combustion (CO, CO₂, NO_x, SO₂, HC...): appareils à gaz non ou mal ventilés, feux de bois, garages attenants, tabagisme.

Aéroallergènes (biologiques et chimiques) : animaux de compagnie, végétaux (pollen, spores), moisissures, « poussière de maison », acariens.

Micro-organismes (bactéries, virus, fungi, protozoaires) : animaux, végétaux, humains, humidificateurs, tapis, toilettes, vide-ordures, équipements de traitement d'air.

Particules respirables : tabagisme, cuisson, combustions mal ventilées, revêtements, diffuseurs d'aérosols, poussières en suspension.

Fibres (amiantes, minérales, synthét.) : isolation, matériaux de construction, matériaux « anti-feu », meubles, revêtements.

Formaldéhyde : panneaux de particules, contreplaqués, isolation (urée-formaldéhyde), matériaux de construction synthétiques, adhésifs, tabagisme.

Composés organiques : matériaux de construction synthétiques, solvants, adhésifs, meubles, peintures, agents de nettoyage, aérosols, tabagisme.

Figure 3. — ORDRES DE GRANDEUR DE LA POLLUTION INTÉRIEURE

Polluants	Gamme de concentrations	Rapport concentr. int./concentr. ext.
Gazeux		
Radon et descendants	10-3 000 Bq/m ³	> 1
CO	1-100 mg/m ³	> 1
NO ₂	0,05-1 mg/m ³	> 1
SO ₂	0,02-1 mg/m ³	< 1
CO ₂	600-9 000 mg/m ³	> 1
O ₃	0,04-0,4 mg/m ³	≈ 1
		Bureaux < 1 Avions > 1
Formaldéhyde	0,05-2 mg/m ³	> 1
Composés organiques	?	> 1
Particulaires (inertes et biologiques)		
Particules respirables	0,05-07 mg/m ³	> 1
Amiantes	< 10 ⁶ fibres/m ³	> 1
Micro-organismes	?	> 1

l'œil fixé sur la pollution intérieure, commencèrent à s'agiter activement et à tirer le signal d'alarme, arguant du fait qu'une grande partie des populations urbaines passe 70 à 80 % du temps à l'intérieur de locaux.

On ne s'étonnera pas que le plus gros des efforts dans ce domaine ait été fourni par les pays industrialisés les plus confrontés à des problèmes d'ordre climatique nécessitant isolation et climatisation, à savoir : les USA, le Canada, les pays nordiques. Mais sont-ce bien là les seules raisons ?...

Toujours est-il que les pays de la Communauté Européenne, dont la France, ont dans l'ensemble pris un certain retard ; il suffit de mentionner deux chiffres pour s'en rendre compte :

— congrès international « Indoor Air 1984 » de Stockholm : pour 800 participants et 300 communications, France : 16 participants, 4 communications ;

— congrès analogue de 1987 à Berlin-Ouest : 14 Français et 2 communications.

SOURCES DE POLLUTION INTÉRIEURE

On peut constater d'après la figure 1 que les sources sont très nombreuses. Ces différentes sources conduisent aux principaux polluants répertoriés sur la figure 2. On notera de plus que les odeurs constituent un paramètre fort intéressant car elles jouent souvent le rôle d'un signal d'alarme de pollutions potentiellement dangereuses. Les ordres de grandeur de la pollution intérieure sont donnés sur la figure 3 : il s'agit de valeurs issues de la littérature qui ont été notamment listées par l'OMS. On remarquera essentiellement que, excepté pour le dioxyde de soufre SO₂, le niveau de pollution intérieure est la plupart du temps supérieur à celui de la pollution extérieure : ceci est particulièrement net pour le radon et ses descendants, ce qui pose — nous le verrons plus loin — un problème délicat du point de vue de la santé publique.

En matière de méthodologie de mesure des polluants à l'intérieur des locaux, on peut approcher la question de deux manières :

— en se basant sur le type de mesure, on distinguera les appareils selon leur échelle de temps : mesures ponctuelles, mesures intégrées séquentielles, mesures continues ;

— on peut raisonner aussi selon la stratégie d'échantillonnage et de mesurage : principe de mesure, type de capteur (personnel ou d'ambiance, portable ou fixe), méthode de collecte (active ou passive), technique d'analyse (analyseur en continu, ou collecteur puis analyse en laboratoire).

On notera, dans ce domaine de la métrologie, l'important développement des capteurs personnels et de la méthode de collecte « passive » dans le cadre des études de pollution intérieure.

VENTILATION ET TRAITEMENT D'AIR

Définissons d'abord une notion d'utilisation courante dans ce domaine : le « taux de renouvellement d'air » (TRA). Ce taux est assuré par la combinaison de l'infiltration naturelle de l'air dans le logement et de la ventilation naturelle ou mécanique. C'est le nombre de fois que le volume d'air de l'espace considéré est changé avec l'air extérieur pendant une période de temps donnée. Le TRA s'exprime en « volumes par heure » (vol/h), équivalent de l'unité anglo-saxonne « air changes per hour » (ach).

Les objectifs généraux de la ventilation sont résumés sur la figure 4 : on voit qu'ils sont multiples. Jouer sur le taux de ventilation pour éliminer les polluants apparaît certes séduisant mais, outre les implications de cette méthode sur l'énergie et le confort, le problème n'est pas toujours aussi simple qu'il paraît. Prenons par exemple le cas du formaldéhyde, illustré par la figure 5 : on constate bien une réduction de la concentration quand le TRA augmente ; toutefois, pour une valeur fixée du taux de renouvellement d'air, la concentration augmente avec la température et avec l'humidité relative.

Un autre éclairage est nécessaire sur la question de l'humidité, sous l'angle de ses interactions avec les autres paramètres de pollution : les problèmes sont résumés sur la figure 6.

Les stratégies de ventilation ont beaucoup évolué au fil des années ; on voit apparaître maintenant des notions telles que les « bâtiments intelligents », la « ventilation intelligente », résumée sur la figure 7. La question consiste à rechercher comment concilier tous les objectifs de la ventilation tels qu'ils ont été définis plus haut. On voit qu'il n'existe pas de réponse

Les techniques de conditionnement d'air ont beaucoup évolué depuis quelques années. On voit apparaître de plus en plus des notions telles que les bâtiments intelligents ou ventilation intelligente (photo JMG).

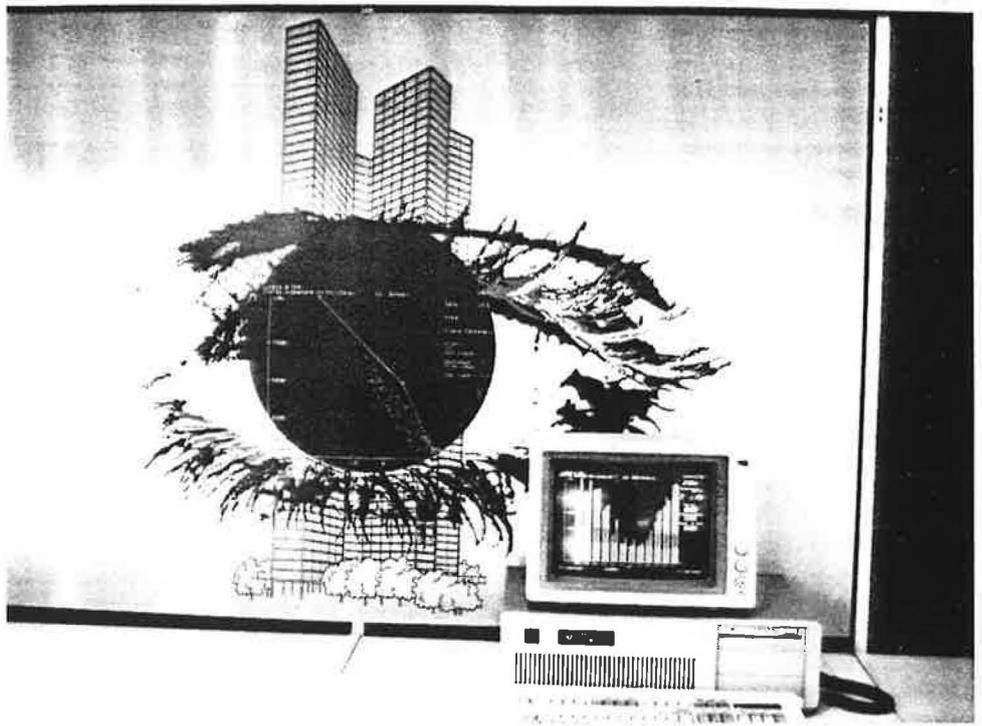


Figure 4. — OBJECTIFS GÉNÉRAUX DE VENTILATION (ventilation naturelle ou mécanique)

- Condensations :** éviter condensations sur les parois froides (murs, fenêtres...).
- Confort :** température, humidité relative, odeurs.
- Santé :** éliminer bioeffluents (métabolisme), éliminer polluants non biologiques.
- Énergie :** minimiser la consommation.
- Conclusion :** le problème consiste à concilier des objectifs souvent contradictoires...

Figure 5. — LE CAS DU FORMALDÉHYDE (tests dans une chambre climatique de 30 m³)
(Source : Wanner et Kuhn, 1986)

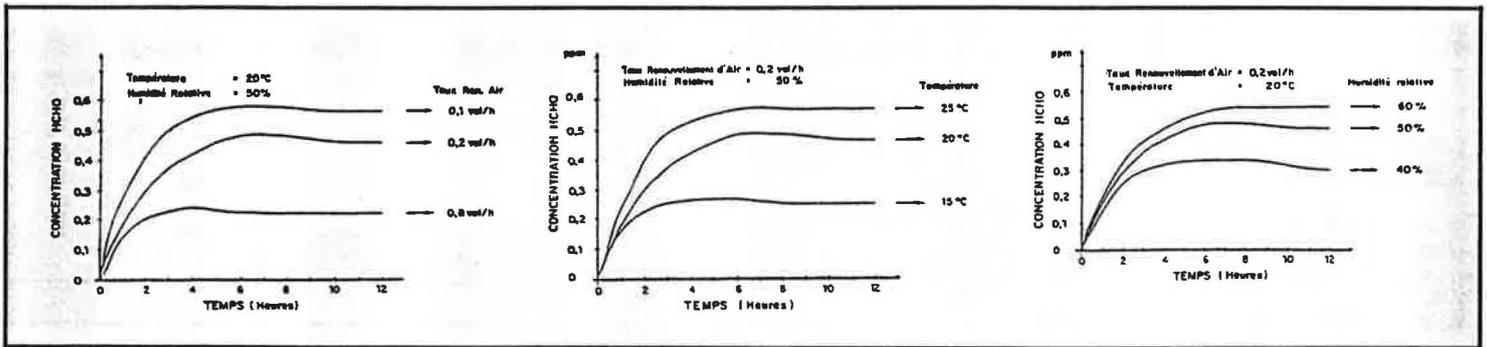


Figure 6. — HUMIDITÉ ET INTERACTIONS

- Micro-organismes :**
Développement populations micro-organismes (moisissures, fungi, levures, acariens...) quand humidité relative > 50 %.
- Risques d'allergies et affections respiratoires diverses.**
Limites à viser : 40 à 70 % d'humidité relative.
Éviter condensations, eau stagnante.
- Formaldéhyde :**
Concentration augmente avec humidité (GODISH-1986).
- Particules inertes et aérosols :**
Réactions chimiques diverses après absorption, adsorption.
Accroissement dégradation des fibres des tapis synthétiques.
Augmentation quantité fibres en suspension.
- Radon :**
Charges électriques favorisent agglomération humidité en fines gouttelettes.
Pénétration et fixation radon dans les poumons.
- Ozone :**
Durée et intensité de l'activité de O₃ dépendent de l'humidité.

unique mais qu'il convient de jouer, dans chaque cas, sur un ensemble de paramètres. On notera, pour ce qui concerne les « standards », que l'évolution souhaitable à 8 l/s par personne, recommandée pour les locaux collectifs (bureaux, écoles, etc.) est déjà largement amorcée puisqu'il semble que ce soit cette valeur qui doit être retenue dans la prochaine version, en cours d'élaboration, des standards de l'Ashrae. Cette stratégie globale implique naturellement une régulation de la ventilation un peu plus fine que ce qu'elle est actuellement. En effet, à ce jour, les paramètres les plus couramment utilisés pour la régulation sont le CO₂ et l'humidité relative. Le CO₂ est produit par la respiration des occupants et par les combustions éventuelles. L'humidité relative dépend de la météorologie extérieure (température et humidité), de la respiration des occupants, des activités (douches, cuisine...),

des phénomènes de stockage et de déstockage (murs, sols...). Chacun de ces deux paramètres est insuffisant pour piloter à lui seul la ventilation dans tous les cas. En effet, ils représentent — mais grossièrement — la présence des occupants ; mais ils ne représentent pas du tout les autres facteurs. On peut donc considérer que l'avenir est sans aucun doute tourné vers une régulation multiparamétrique prenant en compte — éventuellement sous la forme d'un « indice global » à élaborer — les facteurs suivants : CO₂, humidité relative, fumées (lieux avec tabagisme), odeurs (indicateur de divers polluants), polluant spécifique local. Cette approche devient tout à fait envisageable avec le développement actuel des capteurs et de l'informatique. L'important



Figure 7. — LA « VENTILATION INTELLIGENTE »

Une bonne stratégie globale :

Éliminer ou réduire pollution à la source.
Traiter l'air intérieur et/ou extérieur.
Diluer localement.

Une évolution des standards :

Actuellement, ventilation minimum pour locaux sans fumeurs : 2,5 (Ashrae) ou 4 (NKB), (France) l/s par personne. Évolution souhaitable à 8 l/s par personne (bureaux, écoles...)

Une bonne stratégie de ventilation pour économiser l'énergie :

Diminuer les fuites d'air.
Moduler ventilation en fonction présence ou absence occupants.
Moduler ventilation en fonction du nombre d'occupants.
Équiper ventilation de récupérateurs de chaleurs.

Une ventilation efficace :

Utiliser de préférence la « ventilation par déplacement » (avec faible intensité de turbulence).
Séparer les 3 fonctions : chauffage, refroidissement, ventilation.

Un suivi d'exploitation :

Utiliser les ordinateurs...
Enregistrer les paramètres.
Évaluer les résultats.

En résumé :

Le bon débit d'air, au bon endroit, au bon moment, de la bonne manière, au moindre coût.
(Source : adapté de RODAHL 1986 et 1987 et ESDORN 1987)

Figure 8. — ESTIMATION DES RELATIONS RISQUE - EXPOSITION

Très difficile à déterminer. Nécessite nombreux travaux. Évaluation des nuisances : qualité des milieux (air, eau...), exposition des organismes (humains, animaux, végétaux).

Détermination de l'impact biologique (effet sur les équilibres biologiques) : études épidémiologiques (santé des collectivités), études biologiques (homme, modèles expérimentaux).

Développement et mise au point d'outils : biocontaminants (indices qualité biologique des milieux), biomarqueurs (indices biologiques d'exposition).

Figure 9. — EFFETS DE NO₂ SUR LA SANTÉ Courtes expositions. Valeurs en mg/m³ (1 mg/m³ × 0,532 ppm)

Gamme de concentrations	Durée d'exposition	Effet
0,23	Non rapportée	Seuil d'odeur
0,14-0,5	Non rapportée	Seuil d'adaptation inconsciente
0,5-5,0	15 minutes	Augmentation de résistance des voies aériennes chez asthmatiques
7,5-9,4	15 minutes	Décroissance capacité de diffusion pulmonaire
9,4	5 minutes	Différence pression partielle oxygène alvéolo-artérielle
11,3-15,2	5 minutes	Augmentation de résistance des voies aériennes chez adultes sains

(Source : US Dept of Energy, 1986)

développement de la « domotique » peut être considéré comme un premier pas dans la même voie.

LES EFFETS SUR LA SANTÉ

De nombreux progrès ont été réalisés : certains correspondent naturellement à des connaissances déjà acquises à propos de la pollution extérieure ; mais d'autres ont nécessité — et nécessitent encore — des approches spécifiques à la pollution intérieure.

Nous avons jugé utile, au début de cet article, de rappeler la façon dont il convient de procéder pour estimer les relations entre le risque et l'exposition. La procédure est résumée sur la figure 8. Il faut d'une part évaluer les nuisances et d'autre part déterminer l'impact biologique de ces nuisances par différents types d'études. Tout cela nécessite le développement et la mise au point d'outils tels que biocontaminants et biomarqueurs. A l'aide des études qui ont été effectuées sur ces bases, on peut considérer actuellement que le bilan est à peu près universellement admis pour le radon et ses descendants et pour le benzène, en raison des efforts considérables qui ont été accordés sur les expositions carcinogènes. Le bilan est également connu pour l'oxyde de carbone. Par contre, les estimations sont encore approximatives et controversées pour les effets du « tabac environnemental » (non-fumeurs), de NO₂ et des particules respirables.

Les figures 9 et 10 font la synthèse des effets reconnus de NO₂ et du formaldéhyde HC HO pour de courtes expositions. Ces résultats sont à rapprocher des gammes de concentration en ces polluants que l'on est susceptible de rencontrer à l'intérieur des locaux (voir figure 3). Le radon mérite quelques développements. De nombreuses études épidémiologiques ont été menées dans plusieurs pays à partir desquelles des estimations de risque de cancer du poumon ont pu être établies pour les populations de mineurs de mines d'uranium. Ces estimations sont très cohérentes : on voit par exemple sur la figure 11 que les risques établis par les organismes internationaux les plus crédibles entre 1980 et 1985 se situent dans une fourchette de 1 à 8, ce qui représente un important consensus. Par contre, l'estimation du risque pour la population normale, exposée à des ni-

LE RADON

Le radon est un gaz radioactif émis dans l'air par tout ce qui contient du radium : par divers matériaux de construction (grès, agrégats granitiques, briques, etc.), par certains sous-sols d'immeubles, le gaz naturel, etc. Il donne lieu également à la formation de « descendants » radioactifs. Certains pensent qu'il pourrait contribuer au développement de cancers pulmonaires notamment chez les non-fumeurs.

Figure 10. — EFFETS DU FORMALDÉHYDE SUR LA SANTÉ Courtes expositions. Valeurs en mg/m³ (1 mg/m³ × 0,813 ppm)

Gamme de concentrations	Médiane estimée	Effet
0,06-1,2	0,1	Seuil d'odeur pour 50 % population
0,01-1,9	0,5	Seuil d'irritation des yeux
0,1-3,1	0,6	Seuil d'irritation de la gorge
2,5-3,7	3,1	Irritation aiguë du nez, des yeux
5-6,7	5,6	Yeux larmoyants, effets long terme sur les poumons
12-25	17,8	Supportable 30 mn (avec flot de larmes pendant 1 heure)
37-60	37,5	Inflammation poumons, œdème, détresse respiratoire
60-125	—	Mort

(Source : NCTR, USA, 1984)

Figure 11. — RISQUE DE CANCER VIE ENTIÈRE DÙ A L'EXPOSITION AUX DESCENDANTS DU RADON

Année	Source	Risque vie entière cancer poumon (10 ⁻⁴ /WLM)*
1980	National Academy of Sciences (Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation - USA)	7,3
1981	EVANS	1,0
1981	ICRP (Commission Internationale de Protection Radiologique)	1,5-4,5
1982	UNSCEAR (United Nations Scientific committee on the Effects of Atomic Radiation)	2,0-4,5
1982	AECB (Atomic Energy Control Board-Canada)	6,0
1984	NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements - USA)	1,0-2,0
1985	EPA (Environmental Protection Agency-USA)	7,6

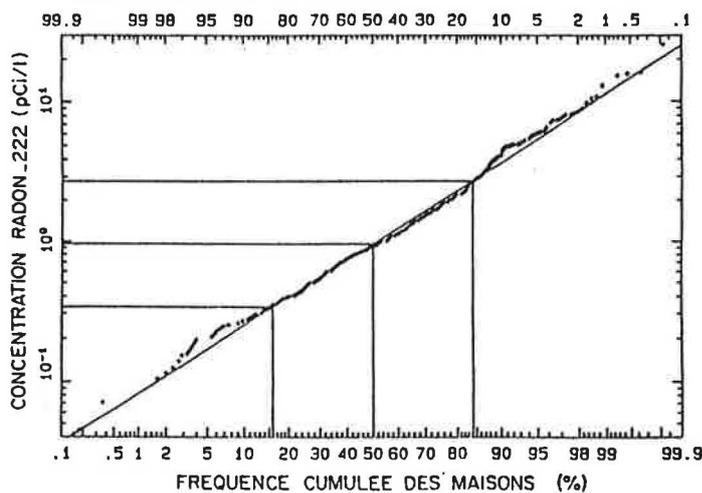
* WLM : Working Level Month

(Source : Amman et al., 1986)

veaux de radon généralement plus faibles, se heurte à d'importantes difficultés méthodologiques. Aussi, toutes les estimations existantes restent basées sur une extrapolation effectuée à partir des études sur les mineurs, et en admettant qu'il n'existe pas de seuil. Ces bases sont cependant maintenant largement admises par la communauté scientifique internationale, et elles sont utilisées dans de nombreux pays en vue d'estimer les risques de cancers du poumon excédentaires pour des populations entières. Aux USA, par exemple, de nombreuses enquêtes effectuées dans différents états ont permis de déterminer, par des mesures à l'intérieur des maisons, l'exposition des populations au radon et à ses descen-

dants : la figure 12 illustre ces résultats. Un autre exposé de cette journée a montré que la France a entrepris des enquêtes semblables depuis une dizaine d'années. A partir de ces mesures et des estimations statistiques de risques, les USA ont pu calculer les excès de morts par cancer du poumon : ces résultats récents ont été présentés au congrès de Berlin-Ouest, on les trouvera résumés sur la figure 13. On peut y constater notamment que l'excès de morts calculé est dû en très grande partie à une exposition au radon à l'intérieur des locaux. La figure 14 résume les caractéristiques essentielles des « maladies des climatiseurs et des humidificateurs », ainsi que leurs origines et les grandes règles à res-

Figure 12. — EXPOSITION AU RADON DE LA POPULATION DES USA
Échantillon de 550 maisons de différents États.
Synthèse de 38 enquêtes résidentielles (source : Grimsrud, 1984)



≥ 1 pCi/l : 50 % des maisons, risque cancer : 0,15 %. ≥ 8 pCi/l : 2 % des maisons, risque cancer : 1 %.

Figure 13. — DISTRIBUTION DES EXPOSITIONS AU RADON ET RISQUE DE CANCERS POUR LA POPULATION AUX USA

Distribution du radon aux USA (milliers de mesures dans résidences)
Estimations pour 1 000 000 de personnes
Risque : 140 cancers poumon excédentaires par million de vies et par Bq/m³
EER* (récent groupe de travail OMS-EURO)

Fraction population (%)	Concentration Rn pG/l	Concentration Rn Bq/m ³ EER	Risque pour expos. intérieure + 2 Bq/m ³ extér.	Excès morts	Excès morts dû expos. intérieure
5,00	0,1	1,85	235	12	10
10,00	0,4	7,40	857	86	83
10,00	0,6	11,10	1 271	127	124
20,00	1,1	19,43	2 204	441	435
20,00	1,8	33,30	3 758	752	746
20,00	4,6	85,10	9 559	1 912	1 906
10,00	9,9	183,15	20 541	2 054	2 051
3,00	20,0	370,00	41 468	1 244	1 243
1,25	45,1	834,35	93 475	1 168	1 168
0,50	52,6	973,10	109 015	545	545
0,25	75,0	1 387,50	155 428	389	389
			Total	8 729	8 701

*Equilibrium Equivalent Radon

(Source : STOLWIJK, 1987)

Figure 14. — MALADIES DES CLIMATISEURS ET DES HUMIDIFICATEURS

Concernent : systèmes centralisés ou non de traitement d'air, aérorefrigerants, générateurs d'aérosols (humidificateurs, douches...)
Contamination peut provenir de l'extérieur (legionella, aspergillus).

Types de maladies :

1. Pathologies infectantes
Légionellose (pneumopathie)
Aspergillose (affection respiratoire)
Fièvre de Pontiac
2. Pathologies allergiques
Fièvre des humidificateurs (« maladie du lundi »)
Allergies (appareil respiratoire)

Origines :

Micro-organismes : Bactéries (ex. : actinomycètes thermophiles)
Virus ?
Amibes libres (protozoaires)
Spores fongiques

Leur développement est favorisé par les conditions de fonctionnement des installations (température, humidité).

Prévention :

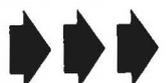
Prise d'air neuf (localisation, prétraitement éventuel)
Conception des systèmes
Installation
Entretien rigoureux

pecter pour une prévention efficace. La figure 15 fait le point sur le sujet très controversé que constitue la « maladie des grands ensembles », pour laquelle on n'a pas encore pu trouver de définition satisfaisante. Ce qui est certain, c'est que la réalité du problème n'est pas mise en cause et que, si les « symptômes » n'ont pas de gravité particulière, la population concernée est considérable (immeubles de bureaux), ce qui entraîne un coût social et économique non négligeable. Le dernier aspect est celui des « bioallergènes », résumé sur la figure 16.

LA QUESTION DE LA RÉGLEMENTATION

Il existe, depuis assez longtemps déjà, des réglementations nationales portant sur de nombreux polluants extérieurs : ces réglementations ont conduit, en France comme ailleurs, à une amélioration sensible de la « qualité de l'air » dans les grandes agglomérations.

Une démarche similaire a été — et se trouve toujours — appliquée à la pollution intérieure. Mais la situation est quelque peu plus complexe, de sorte que la mise au point de réglementations est



encore plus délicate. Elle avance toutefois à grands pas dans de nombreux pays : USA, Canada, RFA, Danemark, Hollande. Elle fait également l'objet d'une intense activité dans des organismes internationaux tels que l'OMS et la CEE. La situation va probablement évoluer rapidement dans les années qui viennent avec l'apparition — relativement récente — d'une nouvelle approche beaucoup plus globale et beaucoup plus cohérente par rapport à la notion « d'effets sur la santé » : il s'agit d'évaluer une « exposition totale », selon un schéma du type de celui qui est présenté sur la figure 17. On

voit bien tout l'intérêt de cette approche consistant à tenir compte à la fois des pollutions intérieures et extérieures puisque c'est bien l'ensemble qui contribue aux effets sur la santé. On notera également la difficulté du passage de l'exposition personnelle totale aux effets proprement dits puisqu'il est naturellement nécessaire de prendre en compte les facteurs personnels, susceptibles d'intervenir aux différents stades de la démarche : mais ce n'est pas un problème nouveau.

réduire la concentration de plus de moitié en augmentant le taux de ventilation dans un immeuble complet.

Dans cette optique, le problème de la « qualité » des matériaux est capital : matériaux de construction, revêtements en tous genres et produits de consommation devraient être considérablement améliorés (émission réduite, traitement des surfaces pour éviter les dégazages, etc.). La réglementation et la perspective du marché unique européen de 1992 ne peuvent naturellement que constituer des incitations majeures dans ce sens.

On trouve dans la littérature récente de très nombreux travaux portant sur les moyens techniques les plus appropriés pour maîtriser la pollution intérieure. Il serait évidemment trop long de tous les citer ici.

A titre d'exemple, prenons le cas particulier du radon et de ses descendants, qui ont été l'objet un peu partout dans le monde d'une attention toute particulière : compte tenu des risques estimés pour la santé, la communauté scientifique internationale (OMS, CIPR (2), EPA (3), etc.) recommande d'une part d'être très vigilant pour toute nouvelle habitation, d'autre part d'intervenir techniquement en vue

MAÎTRISE DE LA POLLUTION INTÉRIEURE

Trois voies parallèles sont possibles — et sont effectivement utilisées de façon complémentaire — pour maîtriser la pollution intérieure : elles sont résumées sur la figure 18. Quelques commentaires s'imposent.

On comprendra aisément que la réduction des émissions à la source soit plus efficace que la dilution par ventilation : on estime que les pollutions intérieures peuvent être fréquemment réduites d'un facteur 3 à 10 par maîtrise des sources, tandis qu'il est quasiment impossible de

Figure 15. — MALADIE DES GRANDS ENSEMBLES

Environ 30 % immeubles neufs font objet surcroît plaintes (souvent temporaires, parfois sur longue durée). Environ 10-30 % des occupants de ces immeubles se plaignent.

Caractéristiques des immeubles concernés :

Immeubles neufs ou rénovés, autres ?
Bien isolés, fenêtres non ouvrables
Air conditionné
Ce sont immeubles où les occupants n'ont aucune prise sur leur environnement climatique

Causes spécifiques des plaintes et symptômes :

Polluants : niveaux rarement élevés pris séparément (sauf parfois formaldéhyde)
Mauvais équilibre des paramètres climatiques (vitesse de l'air, ionisation ?)
Affections microbiologiques éventuelles dues au système de traitement d'air
Conditions de travail
Stress psychosocial
Chaque cause est insuffisante à elle seule

Conclusions :

Pas de définition précise de ce syndrome actuellement
Nombreuses causes, qui interagissent probablement
Études très délicates à mener
Et pourtant, la population concernée est considérable.
Les recherches continuent.

Figure 16. — LES BIOALLERGÈNES

Leur nature :

« Poussière de maison »
Acarions
Animaux domestiques (et litières...)
Moisissures (nombreuses espèces)
Plantes, pollen

Agents favorisant leur développement :

Moquettes, tissus...
Humidité excessive (murs, moquettes...)
Eaux stagnantes (tièdes)

Le cas de la climatisation des immeubles :

2 effets contradictoires :
Épuration par filtrage (notamment vis-à-vis des pollens et moisissures extérieurs)
Développement de moisissures dans les circuits (défauts de conception, installation, entretien...)

Conséquences sur la santé :

Irritation des muqueuses (nez, pharynx, rhino-pharynx)
Allergies spécifiques (asthme, rhinites)
Populations à risques : atopiques (asthmatiques...), population hospitalière

Figure 17. — ÉVALUATION DE « L'EXPOSITION TOTALE »

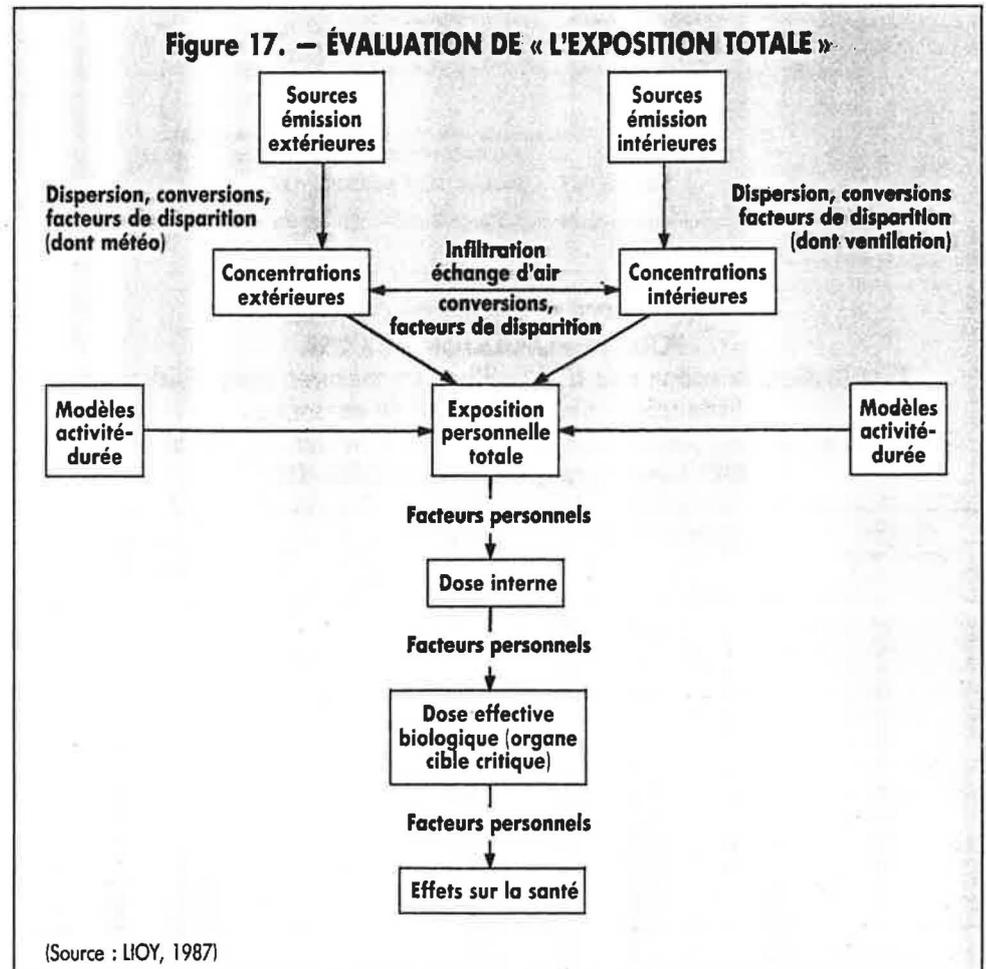


Figure 18. — COMMENT MAÎTRISER LA POLLUTION INTÉRIEURE

Réduire techniquement les émissions à la source :

Adapter la construction (radon)
Qualité des matériaux
Conception des installations (traitement d'air)

Diluer par ventilation :

Évacuations locales
Régulation du taux de renouvellement d'air

Réglementer :

Tabac (lieux publics, collectifs, bureaux...)
Limitier certaines émissions (matériaux, produits de consommation...)

Figure 19. — CONFÉRENCES PLÉNIÈRES

- La détermination des **effets pour la santé** de la pollution atmosphérique intérieure (P.A.I.) — Stolwijk (USA)
- Les **allergènes** dans l'environnement intérieur — Jorde (RFA)
- Que peuvent faire des **architectes** pour améliorer la qualité de l'air « intérieur » ? — Levin (USA)
- **Conditionnement de l'air** : nouveaux horizons, nouvelles possibilités — Esdorn (RFA)
- Une solution au mystère des **bâtiments malades** — Fanger (DK)
- Efficacité de la **ventilation** : passé et avenir — RODAHL (NL)
- **Bactéries atmosphériques** et « climat » intérieur — Dennis (GB)
- **Fumée de tabac** environnementale : un problème de santé publique — Lebowitz (USA)
- **Contrôle** de la P.A.I. — Moschandreas (USA)
- Implication de la **politique des Pouvoirs Publics** dans le cadre de l'exposition à la P.A.I. — Sexton (USA)
- Évaluation du **risque relatif** dû à des expositions et à des dangers intérieurs et besoins futurs — Lindvall (S)

Figure 20. — SYMPOSIA ET/OU AFFICHES

- **Radon** : un problème soluble ? Sources, interactions, mesures de réduction, effets
- **Études polyvalentes de laboratoire ou de terrain** : expositions et effets sanitaires
- **Hyperréactivités et allergies**
- **Ambiance thermique et confort**
- **Composés organiques volatils** : sources, émission, caractérisation et effets
- **Matière particulaire et fibres** : sources, caractérisation et effets
- **Gaz de combustion** : sources et puits — analyse et concentration — caractérisation et effets
- **Mesures pour garantir une qualité** adéquate de l'air intérieur
- « **Bâtiments malades** » : études de cas — recherche — état de l'art
- Pollution atmosphérique intérieure dans les **pays en développement**
- **Composés organiques semi-volatils et particuliers** : mesure en continu et effets pour la santé
- **Efficacité de la ventilation** dans des bâtiments et des pièces
- **Fumée de tabac environnementale** : caractérisation, biomarqueurs, effets sanitaires, études de terrain, remèdes
- **Polluants microbiologiques intérieurs** : sources, caractérisation et effets sanitaires
- Évaluation des **odeurs**, des **irritants** et du formaldéhyde
- **Contrôles** : modification des sources et traitement de l'air
- **Politique et stratégies**

Le congrès de Berlin-Ouest

La 4^e conférence internationale sur « la Qualité de l'Air intérieur et le Climat » (Indoor Air 1987), faisant suite à celles de Copenhague (1978), Amherst, USA (1981) et Stockholm (1984), a été organisée sous les auspices de l'OMS et de la CEE par « l'Institute for Water, Soil and Air Hygiene » de Berlin (RFA) (B. Seifert et collaborateurs) ; le comité consultatif comportait des personnalités scientifiques des USA, du Danemark, des Pays-Bas et de Yougoslavie et des coordinateurs américains, japonais, suédois et britanniques.

Ce congrès qui s'est déroulé du 17 au 21 août 87, en langue anglaise, comportait plusieurs types de présentations ou d'activités :

- des conférences plénières portant sur des thèmes généraux (figure 19),
- des symposia thématiques (figure 20),
- des séances de synthèse des symposia,
- des séances thématiques de présentation d'affiches (posters),
- quelques ateliers (par ex. spores fongiques) ou démonstrations pratiques (par ex. essai de génotoxicité).

Au total, 400 présentations avaient été sélectionnées sur 600 propositions et le congrès s'est déroulé dans d'excellentes conditions matérielles et intellectuelles.

Les thèmes abordés (figures 19 et 20) marquent les préoccupations actuelles en matière de confort et de pollution atmosphérique intérieure des locaux.

Ce congrès a démontré, une fois encore, dans ce domaine, l'avance considérable de nations comme les USA, les pays scandinaves et d'Europe du Nord (Pays-Bas, RFA), la position moyenne de la Grande-Bretagne et du Japon et la présence discrète des pays latins et de la France.

La délégation française était très réduite (moins de 15 personnes au total et 10 en permanence) avec des représentants d'EDF, du CEA, de l'APPA (et de la Ville de Paris), du CSTB en particulier. Elle a pu mesurer, en général, le retard des travaux français publiés en matière de métrologie des polluants, de connaissance des sources et des émissions (sur le terrain ou en laboratoire), de modélisation, d'effets biologiques ou sanitaires (expérimentation, études de cas humains ou épidémiologie) et de technologie (conception, maintenance...).

Un effort urgent reste à faire en France dans ces divers domaines, aux plans politique, scientifique et technique ; on peut se réjouir, dans ce sens, de la prise de conscience collective qui semble se manifester depuis quelque temps sur ce terrain, indépendamment des aspects ponctuels préoccupant depuis longtemps le Ministère chargé de la Santé, par exemple les accidents aigus dus au CO, les vide-ordures... C'est ainsi que l'appel d'offres « Habitat-Santé » de juillet 1987 a associé plusieurs départements ministériels (Environnement, Construction, Éducation Nationale et Santé) afin de stimuler des actions de recherches dans le domaine de la qualité des atmosphères intérieures. Ces actions, par vocation multidisciplinaires, devraient contribuer à ramener la France dans le groupe des nations sérieusement préoccupées par ce thème, ce qui ne va pas sans des retombées économiques importantes en matière de matériaux, de technologie et de santé.

de réduire les concentrations dès lors que celles-ci sont en moyenne de l'ordre de 200 Bq/m³ en équivalent radon à l'équilibre (ce « seuil d'action » n'est toutefois pas toujours le même selon les organisations). Les solutions existent et peuvent être résumées de la façon suivante :

- bien isoler les fondations,
- éviter au maximum d'utiliser des matériaux fortement émetteurs,
- ventiler spécifiquement telle ou telle zone (sous-sols en particulier),
- limiter les concentrations et les dépôts de particules respirables.

PERSPECTIVES

Des perspectives se dégagent actuellement de la revue bibliographique que nous avons effectuée, compte tenu du récent congrès de Berlin-Ouest (voir encadré), des travaux de l'OMS (région Europe) et de ceux d'un groupe de travail de la CEE, « Concerted Action Indoor Air Quality and its Impact on Man » qui se tient à ISPRA depuis 1987.

Il nous semble que la recherche et le développement se sont manifestés récemment dans les domaines suivants :

- le NO₂, les particules et les fibres font l'objet d'un effort très soutenu, de même que les composés organiques volatils ou

semi-volatils, contrairement au dioxyde de soufre qui n'est plus considéré comme sujet d'étude prioritaire,

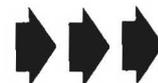
— par contre, les aspects microbiologiques sont encore assez peu explorés, sauf les travaux relatifs aux fungi et aux moisissures qui sont en progrès,

— les études épidémiologiques sont moins nombreuses que dans un passé récent et, d'une manière générale, les organisateurs ont regretté un certain relâchement de la recherche des effets sur la santé,

— les techniques de modélisation sont, par contre, en développement.

Un certain nombre d'acquis sont à noter :

- la nature et l'origine des nuisances sont assez bien cernées,
- les mécanismes physico-chimiques d'émission, d'évolution et de diffusion des polluants sont mieux connus,
- les effets sur la santé sont assez bien définis, voire même quantifiés, dans quelques cas limités comme le CO, le radon, le benzène, le formaldéhyde (sauf en matière de risque cancérigène) et le tabagisme passif.



(2) Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements.
(3) Environmental Protection Agency.



Le nouveau ministère des Finances à Bercy : le plus grand chantier de bureaux d'Europe où la qualité du conditionnement d'air joue un rôle fondamental (photo JMG).

Figure 21. — RECHERCHES PRIORITAIRES DE LABORATOIRE POUR LA CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES POLLUANTS

Polluant	Taux émission	Taux désorption	Source émission	Facteurs environnt.	Instruments calibrés	Systèmes contrôle	Modification sources	Développ. instruments
CO	L	L	M	M	M	L	M	L
NO ₂	L	L	M	M	H	H	M	H
CO ₂	L	L	L	L	L	L	L	L
HCHO	M	M	H	M	H	H	H	H
COV	H	H	H	H	H	H	H	H
Particules organiques	H	H	H	H	H	H	H	H
Particules	H	H	H	H	H	H	M	H
Fibres minérales	H	H	H	H	H	H	H	H
Allergènes	H	H	H	H	H	H	L	H
Radon	H	H	H	H	L	H	NA	L
Odeurs	H	H	H	H	L	H	M	L

NA : non applicable. H : haute priorité. M : priorité moyenne. L : basse priorité. (Source : OMS, 1986)

Figure 22. — RECHERCHES PRIORITAIRES DE LABORATOIRE POUR LES ANALYSES CHIMIQUES

Polluant	Échantillonneurs	Analyse	Méthodes de comparaison	Études inter-laboratoires
CO	L	L	L	L
NO ₂	H	H	M	M
CO ₂	L	L	L	L
HCHO	L	L	L	L
Comp. organ. Volatils non polaires	H	M	H	H
Comp. Organ. Volatils polaires	H	H	H	H
Particules organiques	H	H	H	H
Particules	M	M	M	M
Fibres minérales	M	M	H	H
Allergènes	M	M	M	M
Odeurs	H	H	H	H

H : haute priorité. M : priorité moyenne. L : basse priorité. (Source : OMS, 1986)

Figure 23. — RECHERCHES PRIORITAIRES DE LABORATOIRE DANS LE DOMAINE BIOMÉDICAL

Polluant	Exposition humaine contrôlée	Exposition animale contrôlée	Tests biologiques court terme	Tests d'effets synergiques	Tests sensoriels
CO	L	L	L		-
NO ₂	M	L	L	+	-
CO ₂	L	L	L		-
HCHO	H	M	M	+	-
Comp.Organ. Volatils	H	H	H	+	-
Particules Organ.	M	H	H	+	-
Particules	M	M	H	+	-
Fibres minérales	M	M	M	+	-
Allergènes	M	M	NA	+	-
Radon	NA	L	NA	+	-
Odeurs	H	L	L	+	+

NA : non applicable. H : haute priorité. M : moyenne priorité. L : priorité faible. + : OUI. - : NON. (Source : OMS, 1986)

Des réglementations existent ou sont en cours d'élaboration dans quelques pays pour certains de ces polluants.

Des questions importantes restent l'objet de débats, par exemple :

— comment définir un « climat intérieur normal » ? Il faut sans doute prendre en compte non seulement les paramètres thermo-hygrométriques et la vitesse de l'air, mais aussi les effluents provenant de sources « inertes » ou biologiques (notion de bio-effluent) ;

— le CO₂ n'étant plus reconnu comme suffisant pour caractériser correctement la « qualité de l'air » et le confinement, par quels autres indicateurs faut-il le compléter ?

— plus généralement, sur quel(s) paramètre(s) doit-on fonder une régulation de traitement d'air afin qu'elle soit satisfaisante et économique ?

— comment appréhender la question des indicateurs (micro) biologiques de qualité des milieux environnants, atmosphères et surfaces en l'occurrence ?

— à quels indicateurs biologiques d'exposition ou d'impact peut-on faire appel chez l'être humain et l'épidémiologie est-elle assez sensible pour déceler les effets sanitaires de l'exposition intérieure des locaux ?

— quel est l'effet sur la santé de pointes de pollution isolées et/ou répétées, par NO₂ par exemple ?

— qu'est exactement le « syndrome des bâtiments malsains » ?

Les perspectives d'avenir sont donc nombreuses et concernent des aspects généraux ou plus spécifiques. L'accent devra être mis sur :

— l'établissement d'inventaires de pollution,

— les interactions entre facteurs de pollution ou polluants,

— la qualité des produits, des matériaux de construction ou d'aménagement et des dispositifs (par ex. vide-ordures...) afin qu'ils émettent des polluants en quantité aussi réduite que possible,

— les techniques de modélisation.

— les indicateurs chimiques et microbiologiques de qualité du milieu atmosphérique et les bio-indicateurs d'exposition ou d'impact chez l'homme,

— l'importance de stratégies systémiques et pluridisciplinaires des problèmes avec la coopération des ingénieurs, des biologistes, des médecins, des hygiénistes,...

— le choix d'une approche sanitaire tenant compte d'une exposition globale, dans l'évaluation des risques, comme le préconise l'OMS.

En métrologie, après avoir mieux défini les indicateurs, il faudrait développer des matériels (analyseurs automatiques portables, badges passifs...), procéder à des intercomparaisons d'appareils, de méthodes d'échantillonnage et de mesurage et normaliser des protocoles d'étude des émissions.

Au plan sanitaire, un intérêt accru doit être porté aux composés (semi) volatils, aux indicateurs d'exposition et/ou d'impact susceptibles de s'intégrer dans des enquêtes épidémiologiques.

S'agissant du traitement de l'air, la qualité de ce dernier doit être placée au centre des préoccupations aux stades de la conception, de l'installation et de l'entretien des systèmes et l'exploitation s'appuiera sur une régulation multiparamétrique.

En outre, la maîtrise de la pollution prendra en compte la qualité de l'air extérieur et résultera de l'amélioration des matériaux et des systèmes, du développement de la technologie des capteurs, d'une meilleure compréhension théorique des

mécanismes d'émission et d'interaction des polluants, de la maîtrise et de la régulation de la ventilation, naturelle ou non.

La réglementation, enfin, est à suivre de près : en plein développement pour les ambiances professionnelles non spécifiques, moins pour les locaux collectifs et l'habitat, elle est cruciale par ses implications économiques dans l'exportation des technologies ou des produits. Elle peut concerner, par exemple, des protocoles d'émission (formaldéhyde), des taux de renouvellement d'air, etc.

En définitive, on assiste donc à une reconnaissance de l'importance sanitaire des pollutions intérieures en termes de confort et de santé. L'OMS, en particulier, a été la première institution attentive à cet important problème.

Plusieurs groupes de travail formés d'experts internationaux ont, pour une part, mené une réflexion générale sur ce thème et, par ailleurs, essayé d'évaluer le risque lié à de nombreux polluants considérés individuellement ou par familles ; dans chaque cas, on se préoccupe du risque global, associé aux diverses formes d'exposition, qu'il s'agisse des milieux physiques (air, eaux...) ou des activités (professionnelle, domestique...). En 1986, l'OMS a proposé des programmes de recherches de laboratoire prioritaires en pollution atmosphérique, s'agissant de caractérisation physique (figure 21) ou d'analyse chimique (figure 22) des polluants ou facteurs de pollution et s'agissant d'effets biologiques (figure 23). Enfin, en 1987, l'OMS a publié pour l'Europe un recueil de recommandations relatives à la qualité de l'air qui, pour un grand nombre de polluants, prend en compte les sources à la fois extérieures et intérieures de pollution (figure 24).

La France peut et doit aller dans cette voie qui implique une prise en compte technique et sanitaire globale des pollutions atmosphériques (et autres) et non pas seulement sectorielle ; dans le cadre d'une telle stratégie, les pollutions intérieures des locaux ont une grande place et il convient de rattraper d'urgence notre retard par un réel effort concerté et multidisciplinaire.

Figure 24. — POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET POPULATION GÉNÉRALE : RECOMMANDATIONS DE L'ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ (OMS)*
* AIR QUALITY GUIDELINES FOR EUROPE 1987

Indicateurs de pollution	Durée					
	15 min	30 min	60 min	8 h	24 h	Année
Dioxyde de soufre (SO ₂) (µg · m ⁻³)					125	50
Fumées noires (F.N.) (µg · m ⁻³)					125	50
Particules totales en suspension (TSP) (µg · m ⁻³)					120	—
Monoxyde de carbone (CO) (ppm)	100	50	25	← 10 →		
(mg · m ⁻³)	115	55	29	← 11,5 →		
Oxydes d'azote : dioxyde NO ₂ (ppm)			0,21		0,08	
(µg · m ⁻³)			400		150	
Ozone et autres oxydants photochimiques : O ₃ (ppm)			0,076-0,1	0,05-0,06		
(µg · m ⁻³)			150-200	100-120		

BIBLIOGRAPHIE (p. 66)