

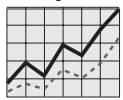


Figure 44.5 • Planification des mesurages dans le cadre d'une évaluation exploratoire

TYPE DE MESURAGE	OBJECTIF
 <p>Mesurages exploratoires</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la situation environnementale • Détection des défauts évidents • Mesures correctives • Planification des mesurages approfondis
 <p>Mesurages approfondis</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Etude détaillée des problèmes environnementaux • Collecte des données en vue d'une action ultérieure • Développement de nouvelles techniques • Amélioration de la méthodologie
 <p>Mesurages de contrôle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des mesurages effectués • Réalisation des objectifs visés

sans perte de précision (en augmentant, par exemple, le volume d'air analysé) et de vérifier leur spécificité.

D'un autre côté, les méthodes employées pour mesurer les concentrations de polluants dans l'air extérieur sont les mêmes que celles qui sont utilisées pour l'air intérieur; elles peuvent donc être soit appliquées directement à l'intérieur, soit être facilement adaptées. Il importe, néanmoins, de ne pas oublier que certaines de ces méthodes sont conçues pour l'analyse directe d'un échantillon, alors que d'autres nécessitent des appareils encombrants et parfois bruyants et le prélèvement de grandes quantités d'air, ce qui risque de fausser les résultats.

La planification des mesurages

On peut, pour améliorer la qualité de l'air intérieur, utiliser la procédure classique que l'on applique pour le contrôle du milieu de travail. Elle consiste à identifier et à quantifier un problème, à proposer des mesures correctives et à veiller à leur mise en œuvre, et à évaluer enfin leur efficacité après un certain laps de temps. Cette procédure habituelle n'est pas toujours la mieux adaptée dans le cas qui nous intéresse, car elle est très minutieuse et exige la prise de nombreux échantillons; ce n'est pas toujours nécessaire dans notre cas. Les méthodes exploratoires — qu'il s'agisse d'une simple inspection visuelle ou d'une analyse de l'air ambiant par des méthodes directes — peuvent fournir une idée de la concentration de polluants et permettent souvent de résoudre les problèmes rencontrés. Une fois que les mesures correctives adéquates ont été prises, les résultats peuvent être évalués par un nouvel ensemble de mesurages. Ce n'est qu'en l'absence d'amélioration notable que des contrôles plus approfondis ou une étude analytique complète se justifient (Swedish Work Environment Fund, 1988).

Les principaux avantages de ces mesurages exploratoires par rapport aux méthodes classiques sont leur économie, leur rapidité et leur efficacité. Ils exigent évidemment un personnel compétent et expérimenté et l'emploi d'un matériel approprié. La figure 44.5 résume les objectifs visés par les différentes étapes de la procédure.

La stratégie d'échantillonnage

Le contrôle analytique de la qualité de l'air intérieur ne devrait être envisagé qu'en dernier recours, lorsque les résultats négatifs des mesurages exploratoires en ont démontré l'utilité, ou qu'une

évaluation ultérieure ou un contrôle des résultats initiaux s'avèrent nécessaires.

Même si l'on connaît d'avance les sources et la nature des contaminants, il convient de les vérifier en prélevant des échantillons, même en nombre limité, dans chacun des locaux étudiés. Ces prélèvements devraient être planifiés avec soin afin de définir leur objet, la méthode à mettre en œuvre, leur emplacement et le moment le plus approprié pour y procéder.

L'objet

Le ou les polluants à étudier devraient être identifiés au préalable. Compte tenu du type de question auxquelles on souhaite pouvoir répondre, il conviendra de décider s'il faut procéder à des mesurages d'émissions, ou d'immissions.

Le mesurage des émissions devrait permettre de déterminer les effets des diverses sources de pollution, des conditions climatiques, des caractéristiques du bâtiment et des interventions humaines, en vue de contrôler les sources d'émissions et d'améliorer ainsi la qualité de l'air intérieur. Il existe différentes techniques pour procéder à ce genre de mesurages: on peut placer un appareil de captage près de la source d'émission, définir une zone d'observation et y étudier les émissions en situation réelle, ou encore travailler en simulation en faisant appel à des systèmes qui reposent sur des mesures d'espace de tête.

Le mesurage des immissions devrait permettre de déterminer le niveau de pollution de l'air intérieur dans les différentes zones du bâtiment et d'établir ainsi une carte générale de la pollution intérieure. Grâce à ces mesurages et en délimitant les diverses zones où sont pratiquées différentes activités et calculant le temps que les gens ont consacré chaque jour à chacune de leurs tâches, il sera possible de déterminer les niveaux d'exposition. Un autre moyen de procéder est d'équiper chaque travailleur d'un appareil de prélèvement individuel.

Il est parfois préférable, si les polluants sont nombreux et variés, de s'en tenir à quelques substances représentatives du milieu considéré afin de limiter le coût des opérations sans compromettre la représentativité de leurs résultats.

La méthode

Le choix du type de mesurage à effectuer dépendra de la méthode qu'il est possible d'appliquer (lecture directe ou prélèvement suivis d'analyse) et de l'objectif visé (émission ou immission).

L'emplacement

Le lieu choisi pour les prélèvements devrait être celui qui est le plus approprié et qui fournira les échantillons les plus représentatifs. Il faut donc bien connaître le bâtiment étudié: orientation par rapport au soleil, nombre d'heures d'exposition directe au soleil; nombre d'étages; distribution interne; ventilation naturelle ou mécanique; possibilité d'ouvrir les fenêtres; etc. Il est également nécessaire de connaître l'origine des plaintes enregistrées et de savoir si les problèmes se posent aux étages élevés ou inférieurs, en des endroits clos ou éloignés des fenêtres ou dans des zones mal ventilées ou mal éclairées, par exemple. On choisira les meilleurs endroits de prélèvement en tenant compte de l'ensemble des données recueillies.

Le moment

La question de savoir à quel moment il convient de procéder aux prélèvements ou aux mesurages dépend de la façon dont les concentrations de polluants évoluent dans le temps. Ce peut être tôt le matin, pendant la journée de travail ou en fin de journée; au début ou en fin de semaine; en hiver ou en été; quand la climatisation fonctionne ou lorsqu'elle est arrêtée ou à d'autres moments.

Pour en décider, il importe de connaître la dynamique de l'environnement intérieur étudié et les objectifs des mesurages

entrepris, qui seront eux-mêmes fonction des types de polluants considérés. La dynamique de l'environnement intérieur est influencée par la diversité des sources de pollution, les caractéristiques physiques des locaux étudiés, la distribution de ces locaux, le système de ventilation et de climatisation en place, les conditions atmosphériques extérieures (vent, température, etc.) et les caractéristiques du bâtiment (nombre de fenêtres, leur orientation, etc.).

Les objectifs que l'on s'est fixés détermineront la périodicité des prélèvements. Si l'on estime que les contaminants présents peuvent avoir des effets durables sur la santé, on déterminera les concentrations moyennes sur de longues périodes. Si l'on suspecte que les émissions sont intenses, mais de courte durée, il y aura lieu d'effectuer des prélèvements fréquents sur de courtes périodes afin de déterminer le moment où elles se produisent. Pour les substances qui peuvent avoir des effets très marqués, mais non cumulatifs, des mesurages de courte durée suffiront. Dans bien des cas, toutefois, le choix des méthodes de prélèvement et de mesurage dépendra des appareils et des instruments dont on dispose.

Si, une fois que toutes ces questions ont été prises en compte, l'origine du problème n'a pu être établie, ou si le problème se pose à nouveau peu de temps après, la décision visant le lieu et le moment des prélèvements sera prise au hasard, le nombre des échantillons étant alors fonction du niveau de fiabilité souhaité et du coût de l'opération.

Les techniques de mesurage

Les méthodes dont on dispose pour le mesurage ou pour le prélèvement et l'analyse des échantillons d'air intérieur peuvent être regroupées en deux catégories: les méthodes par lecture directe, et celles qui nécessitent un prélèvement suivi d'une analyse.

Dans les méthodes par lecture directe, le prélèvement de l'échantillon et le mesurage de la concentration de polluant sont simultanés; ces méthodes sont rapides et leurs résultats quasiment instantanés, ce qui permet d'obtenir des données assez précises à un coût relativement modéré. Elles comprennent les *tubes colorimétriques* et les *analyseurs spécifiques*.

Les tubes détecteurs colorimétriques sont basés sur le changement de coloration d'un réactif au contact de la substance à étudier. Les tubes les plus courants contiennent un réactif absorbant solide; l'air est aspiré dans le tube à l'aide d'une pompe à main ou d'une poire. L'utilisation de ces tubes est limitée aux mesurages de nature préliminaire et à ceux qui portent sur des émissions sporadiques, car leur sensibilité est assez faible, sauf pour certains polluants tels que le CO et le CO₂ dont les concentrations dans l'air peuvent être élevées. En outre, les indications fournies par ces tubes manquent de précision, et il faut tenir compte des interférences si d'autres contaminants sont également présents dans l'atmosphère à tester.

Dans le cas des analyseurs spécifiques, la détection des polluants se fonde sur les principes de la physique (électricité, thermodynamique, électromagnétisme) et de la chimie. La plupart des analyseurs de ce type sont utilisables pour des mesurages de courte comme de longue durée et permettent d'obtenir un profil de contamination en un lieu donné. Leur précision est fixée par le fabricant et leur usage correct exige des étalonnages périodiques en atmosphères contrôlées ou avec des mélanges de gaz certifiés. Les appareils sont de plus en plus précis et leur sensibilité s'est affinée. Beaucoup sont équipés d'une mémoire incorporée qui permet de stocker les résultats des mesurages, lesquels seront ensuite aptes à être traités par ordinateur.

Selon la technique utilisée, on distingue les méthodes de prélèvement et d'analyse *actives* (ou dynamiques) et les méthodes *passives*.

Avec les systèmes actifs, les polluants sont captés en aspirant l'air à analyser au travers de filtres, d'adsorbants solides ou de solutions absorbantes ou réactives contenues dans des barboteurs; dans certains appareils, l'air vient imprégner un matériau poreux.

On procède ensuite à l'analyse du contaminant ou des composés de la réaction à laquelle il a donné lieu. Le matériel requis comprend un agent fixateur, une pompe à air et un dispositif pour mesurer le volume d'air prélevé soit directement, soit en déterminant le débit et la durée de passage de l'air.

Le débit d'échantillonnage ou le volume d'air prélevé sont précisés dans des manuels ou peuvent être déterminés par des tests préliminaires. Ils dépendront de la quantité et du type d'absorbant ou d'adsorbant utilisé, des polluants considérés, de l'objet du mesurage (émission ou immission) et des conditions de l'atmosphère ambiante au moment du prélèvement (humidité, température et pression). La collecte sera plus efficace si l'on réduit le débit d'admission de l'air ou si l'on augmente la quantité de fixateur soit directement soit en tandem.

Un autre type de prélèvement actif consiste à capter directement l'air à analyser dans un sac ou tout autre récipient inerte et imperméable. Ce type de collecte d'échantillons est employé pour certains gaz (CO, CO₂, H₂S, O₂); il est utile pour un mesurage préliminaire lorsqu'on ne connaît pas le type de polluant. L'inconvénient est que si l'on ne concentre pas l'échantillon, la sensibilité risque d'être insuffisante et il faudra sans doute augmenter la concentration en laboratoire.

Les systèmes passifs captent les polluants par diffusion ou par infiltration sur une base qui peut être un adsorbant solide nu ou imprégné d'un réactif spécifique. Ces systèmes sont plus commodes et d'utilisation plus aisée que les systèmes actifs. Nul besoin d'une pompe pour aspirer l'échantillon, ni d'un personnel formé. Toutefois, le prélèvement peut prendre du temps et ne fournir que des niveaux de concentration moyens. La méthode ne se prête pas à la mise en évidence de pics de concentration, pour lesquels il vaut mieux faire appel aux systèmes actifs. L'utilisation correcte des systèmes passifs exige la connaissance de la vitesse de captage de chaque polluant, qui dépend du coefficient de diffusion du gaz ou de la vapeur considérés ainsi que du modèle de l'analyseur.

Le tableau 44.10 présente une synthèse des principales caractéristiques des différentes méthodes de mesurage. Quant au tableau 44.11, il regroupe les diverses méthodes utilisées pour prélever et analyser les échantillons des polluants de l'air intérieur les plus courants.

Le choix de la méthode

Pour décider quelle est la meilleure méthode de prélèvement, il importe en premier lieu de savoir s'il existe des méthodes validées pour les polluants considérés et si l'on dispose des instruments et du matériel appropriés pour leur application. On a besoin en général de connaître le coût et la sensibilité de chaque méthode, ainsi que les possibilités d'interférences.

Tableau 44.10 • Méthodes de mesurage

Caractéristiques	Méthode active	Méthode passive	Lecture directe
Mesurages à intervalles de temps réguliers	+		+
Mesurages de longue durée		+	+
Monitoring			+
Concentration de l'échantillon	+	+	
Mesurage de l'immission	+	+	+
Mesurage de l'émission	+	+	+
Réponse immédiate			+

+ signifie que la méthode considérée convient aux critères de mesurage souhaités.

Il est aussi utile d'avoir une idée des concentrations minimales que l'on compte mesurer. La concentration minimale d'un polluant dépend directement de la quantité (masse) de polluant qui peut être prélevée dans les conditions requises par la méthode choisie (système de captage du polluant, durée du prélèvement ou volume d'air prélevé, par exemple). C'est cette quantité minimale qui définit la sensibilité requise. On la calcule à partir des données de référence trouvées dans la documentation relative au polluant ou au groupe de polluants considérés, pour autant que ces données aient été obtenues par une méthode analogue à celle que l'on compte utiliser. Ainsi, si l'on constate que des concentrations d'hydrocarbures de l'ordre de 30 µg/m³ sont courantes dans la zone étudiée, la méthode analytique choisie devrait permettre de les mesurer facilement. En supposant que l'échantillon soit recueilli dans un tube de charbon actif en quatre heures, avec un débit de 0,5 litre d'air par minute, la masse d'hydrocarbures présente dans l'échantillon sera égale au produit du débit par la durée du prélèvement (c'est-à-dire au volume) multiplié par la concentration pondérale. Dans l'exemple ci-dessus, elle serait égale à :

$$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \cdot 240 \text{ min} \cdot 30 \text{ } \mu\text{g m}^{-3} \\ = 0,5 \cdot 240 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{g} = 3,6 \text{ } \mu\text{g}.$$

On pourra donc, pour détecter ces hydrocarbures, faire appel à toute méthode nécessitant un échantillon dont la masse de polluant ne dépasse pas 3,6 µg.

Une autre estimation pourrait être basée sur la valeur limite d'exposition dans l'air intérieur pour le polluant considéré. Si ce genre de donnée n'est pas disponible et si l'on ne connaît ni les concentrations habituelles dans l'air intérieur, ni le rythme d'émission du polluant dans l'espace, on peut utiliser des approxima-

tions fondées sur les concentrations de ce polluant potentiellement dangereuses pour la santé. La méthode choisie devrait permettre de mesurer 10% de la valeur limite établie ou de la concentration minimale susceptible de mettre la santé en danger. Même si la méthode d'analyse retenue a un degré de sensibilité acceptable, il est possible que l'on rencontre des concentrations de polluants plus faibles que la valeur de la limite inférieure de détection de la méthode choisie. Il faut en tenir compte dans le calcul des concentrations moyennes. Ainsi, si trois lectures sur dix sont inférieures à la limite de détection, il faudra calculer deux moyennes, l'une où l'on donne à ces trois lectures la valeur zéro, et l'autre où on leur donne la valeur de la limite inférieure de détection, ce qui aboutira à une moyenne minimale et à une moyenne maximale. La vraie moyenne se trouvera entre les deux.

Les procédures d'analyse

Les polluants de l'air des locaux intérieurs sont nombreux et normalement en de faibles concentrations. La méthodologie disponible pour leur évaluation est fondée sur l'adaptation des méthodes utilisées pour contrôler la qualité de l'air extérieur et celle de l'atmosphère des sites industriels. Cette adaptation exige que l'on modifie la plage des concentrations recherchées, lorsque la méthode le permet, en utilisant des temps de prélèvement plus longs et de plus grandes quantités d'adsorbants ou d'absorbants. Ces modifications sont valables à condition qu'elles n'entraînent pas de perte de fiabilité ou de précision. Le mesurage d'un mélange de contaminants est un processus généralement coûteux, et les résultats obtenus sont peu précis. Très souvent, tout ce que l'on pourra obtenir sera un profil de pollution montrant le niveau de contamination intérieure pendant les périodes de prélèvement par rapport à un air pur, à l'air extérieur ou à l'atmosphère

Tableau 44.11 • Méthodes de détection des gaz présents dans l'air des locaux intérieurs

Polluant	Lecture directe	Méthodes			Analyse
		Captage par diffusion	Captage par concentration	Captage direct	
Monoxyde de carbone	Cellule électrochimique Spectroscopie infrarouge			Sac ou récipient inerte	GC ^a
Ozone	Chimiluminescence		Barboteur		UV-Vis ^b
Dioxyde de soufre	Cellule électrochimique		Barboteur		UV-Vis
Dioxyde d'azote	Chimiluminescence Cellule électrochimique	Filtre imprégné d'un réactif	Barboteur		UV-Vis
Dioxyde de carbone	Spectroscopie infrarouges			Sac ou récipient inerte	CG
Formaldéhyde	—	Filtre imprégné d'un réactif	Barboteur Adsorbants solides		CLHP ^c Polarographie UV-Vis
Composé organiques volatils (COV)	CG portable	Adsorbants solides	Adsorbants solides	Sac ou récipient inerte	CG (DCE ^d -DIF ^e -DT ^f -DPI ^g) CG-SM ^h
Pesticides	—		Adsorbants solides Barboteur Filtre Combinaisons		CG (DCE-DIF-DT) CG-EM
Matières particulaires	—	Capteur optique	Filtre	Impacteur Cyclone	Gravimétrie Microscopie

— : méthode inapplicable pour le polluant.

^a CG: chromatographie en phase gazeuse. ^b UV-Vis: spectrophotométrie ultraviolette. ^c CLHP: chromatographie en phase liquide de haute précision. ^d DCE: détecteur à capture d'électrons. ^e DIF: détecteur à ionisation de flamme. ^f DT: détecteur thermo-ionique. ^g DPI: détecteur à ionisation photoélectrique. ^h SM: spectrométrie de masse.

d'autres espaces intérieurs. Pour contrôler ce profil de pollution, on a recours à des moniteurs ou analyseurs à lecture directe, mal acceptés s'ils sont trop bruyants ou trop encombrants. On s'efforce actuellement de mettre au point des appareils toujours plus petits et moins bruyants dont la sensibilité et la précision soient améliorées. Le tableau 44.12 résume la situation actuelle en ce qui concerne les méthodes utilisées pour les différents types de contaminants.

Les gaz

Ce sont les méthodes actives qui sont les plus couramment utilisées pour le prélèvement et l'analyse des gaz. Elles font appel à des solutions absorbantes ou à des adsorbants solides, ou au prélèvement direct d'échantillons d'air dans un sac ou autre récipient inerte et étanche. Pour empêcher qu'une partie de l'échantillon ne se perde et obtenir des mesures plus précises, le volume de l'échantillon doit être inférieur aux volumes utilisés pour les autres types de pollution, et la quantité d'adsorbant ou d'adsorbant plus grande. Il faut veiller particulièrement aux conditions de transport et de stockage des échantillons (les conserver à basse température) et limiter le temps écoulé entre les prélèvements et les analyses. Ces méthodes directes sont très utilisées pour les gaz en raison des améliorations considérables apportées à la performance des appareils modernes, plus sensibles et plus précis qu'auparavant. Grâce à la facilité d'emploi et à la qualité des informations fournies par ces techniques, on tend à les substituer de plus en plus aux méthodes d'analyse traditionnelles. Le tableau 44.13 indique les niveaux de détection minimaux que l'on peut obtenir pour quelques gaz courants, en fonction de la méthode de prélèvement et d'analyse employée.

Ces gaz sont des polluants fréquemment présents dans l'air intérieur. On mesure leur concentration à l'aide de moniteurs qui peuvent les détecter directement par des procédés électrochimiques ou infrarouges, encore que les détecteurs infrarouges ne soient pas très sensibles. On peut aussi prélever directement des échantillons d'air dans des sacs inertes et étanches puis analyser ces échantillons par chromatographie en phase gazeuse, grâce à un détecteur à ionisation de flamme qui transforme d'abord les gaz en méthane par une réaction catalytique. Les détecteurs à conduction thermique sont en général suffisamment sensibles pour mesurer les concentrations ordinaires de CO₂.

Le dioxyde d'azote

Pour détecter le dioxyde d'azote (NO₂) dans l'air intérieur, on prélève des échantillons qui sont analysés ultérieurement; ces méthodes passives posent toutefois des problèmes de sensibilité qui devraient pouvoir être résolus à l'avenir. La méthode la plus connue est celle du tube de Palmes dont la sensibilité se situe à 300 ppb environ. Dans les bâtiments non industriels, les prélèvements devraient s'étendre sur cinq jours au moins si l'on veut obtenir une limite de détection de 1,5 ppb, ce qui est le triple de la valeur d'essai à blanc pour une exposition d'une semaine. Des analyseurs portatifs mesurant en temps réel ont aussi été mis au point. Ils font appel à la réaction de chimiluminescence entre le NO₂ et le luminol réactif; les résultats obtenus par cette méthode peuvent néanmoins être affectés par la température, tandis que leur linéarité et la sensibilité de la méthode dépendent des propriétés de la solution de luminol utilisée. Les analyseurs équipés de capteurs électrochimiques ont amélioré la sensibilité, mais ils sont sujets à des interférences provenant de composés contenant du soufre (Freixa, 1993).

Le dioxyde de soufre

Pour mesurer le dioxyde de soufre (SO₂) dans un local intérieur, on recourt à la spectrophotométrie. L'échantillon d'air barbote dans une solution de tétrachloromercuriate de potassium pour

Tableau 44.12 • Méthodes utilisées pour le prélèvement et l'analyse des polluants chimiques

Polluant	Analyseurs à lecture directe ^a	Prélèvement suivi d'analyse
Monoxyde de carbone	+	+
Dioxyde de carbone	+	+
Dioxyde d'azote	+	+
Formaldéhyde	-	+
Dioxyde de soufre	+	+
Ozone	+	+
COV	+	+
Pesticides	-	+
Matières particulaires	+	+

^a + = courants; - = inapplicable.

former un complexe stable qui sera analysé par spectrophotométrie après réaction avec de la pararosaniline. D'autres méthodes se fondent sur la photométrie de flamme et sur la fluorescence ultraviolette pulsée; il existe aussi des méthodes où la mesure s'obtient avant l'analyse spectroscopique. Cette technique, utilisée pour l'analyse de l'air extérieur, ne convient pas à l'analyse de l'air intérieur, car elle manque de spécificité et les appareils nécessitent souvent un système de ventilation pour éliminer les gaz qu'ils génèrent. Etant donné que les émissions de SO₂ ont fortement diminué et que ce composé n'est plus considéré comme un important polluant de l'air intérieur, le développement d'analyseurs pour la détection de ce gaz n'a pas beaucoup progressé. Il existe également des appareils portatifs qui peuvent détecter le SO₂ à partir de la pararosaniline (Freixa, 1993).

L'ozone

La présence d'ozone (O₃) dans les bâtiments est assez rare et se limite aux situations où ce gaz est produit de manière continue; en effet, il se décompose rapidement. On le mesure par des méthodes d'analyse directe, avec des tubes colorimétriques ou par chimiluminescence. Il peut aussi être détecté par des techniques d'hygiène industrielle facilement adaptables à l'évaluation de la qualité de l'air intérieur. Les échantillons sont préparés en utilisant une solution absorbante d'iodure de potassium en milieu neutre avant d'être soumis à une analyse spectrophotométrique.

Tableau 44.13 • Limites inférieures de détection de certains gaz par les appareils utilisés pour évaluer la qualité de l'air intérieur^a

Polluant	Analyseurs à lecture directe	Prélèvement et analyse active/passive
Monoxyde de carbone	1,0 ppm	0,05 ppm
Dioxyde d'azote	2 ppb	1,5 ppb (1 semaine) ^b
Ozone	4 ppb	5,0 ppb
Formaldéhyde		5,0 ppb (1 semaine) ^b

^a Les analyseurs de monoxyde de carbone qui utilisent la spectroscopie infrarouge ont toujours une sensibilité suffisante. ^b Durée de l'exposition pour les analyseurs passifs.

Le formaldéhyde

Le formaldéhyde est un important polluant de l'air intérieur; en raison de ses caractéristiques chimiques et toxiques, il est recommandé d'en faire une analyse séparée. Les différentes méthodes de détection du formaldéhyde dans l'air sont toutes basées sur le prélèvement d'échantillons soit à l'aide d'un fixateur actif, soit par diffusion. La méthode de captage la plus appropriée dépendra de la nature du prélèvement (émission ou immission) et de la sensibilité de la méthode analytique. Les méthodes traditionnelles partent d'un échantillon obtenu en faisant barboter de l'air dans de l'eau distillée ou dans une solution de bisulfate de sodium à 1% portée à 5 °C qui est ensuite analysée par spectrofluorométrie. Il importe que les échantillons soient conservés à 5 °C. Le SO₂ et les composants de la fumée de tabac peuvent créer des interférences. Les systèmes actifs ou les méthodes de captage des polluants par diffusion sur des adsorbants solides sont de plus en plus fréquemment utilisés pour les analyses de l'air intérieur; ils comportent tous une base qui peut être un solide saturé par un réactif tel que le bisulfate de sodium ou la 2,4-diphénylhydrazine. Les méthodes de captage du polluant par diffusion, outre les avantages généraux qu'elles présentent, sont plus sensibles que les méthodes actives, car la durée d'obtention des échantillons est plus longue (Freixa, 1993).

La détection des composés organiques volatils (COV)

Les méthodes employées pour la surveillance des vapeurs organiques dans l'air intérieur doivent répondre à une série de critères: elles devraient avoir une sensibilité de l'ordre de parties par milliard (ppb) ou de parties par billion (ppt); les appareils dont on se sert pour prélever les échantillons ou procéder à une analyse directe devraient être portatifs et faciles à utiliser sur le terrain; les résultats fournis devraient être précis et reproductibles. De nombreuses méthodes répondent à ces critères, mais celles qui sont le plus fréquemment employées pour analyser l'air intérieur se fondent sur le prélèvement d'échantillons et leur analyse ultérieure. Il existe bien sûr des méthodes de détection directe qui font appel à des chromatographes en phase gazeuse portables et à différentes méthodes de détection, mais ces appareils sont coûteux, leur emploi est compliqué et seules des personnes qualifiées sont capables de s'en servir. Pour les composés organiques polaires et non polaires dont le point d'ébullition se situe entre 0 °C et 300 °C, l'adsorbant le plus utilisé, pour les méthodes actives comme pour les méthodes passives, est le charbon actif. On peut aussi avoir recours à des polymères poreux et à des résines polymères telles que le Tenax GC, le XAD-2 et l'Amborsorb (le plus employé est le Tenax). Les échantillons recueillis sur charbon actif sont extraits à l'aide de sulfure de carbone avant d'être analysés par chromatographie en phase gazeuse avec ionisation de flamme, par capture d'électrons ou par spectrométrie de masse, ce qui permet une analyse qualitative et quantitative à la fois. Les échantillons obtenus sur Tenax sont généralement extraits par désorption thermique à l'hélium, puis condensés dans un piège d'azote froid avant d'être traités par chromatographie. Une autre méthode courante consiste à prélever directement les échantillons dans des sacs ou des récipients inertes et étanches et à les analyser directement par chromatographie en phase gazeuse, ou encore à concentrer d'abord les échantillons sur un adsorbant et un piège froid. Les limites de détection de ces différentes méthodes dépendent du composé à analyser, du volume prélevé, de la pollution de fond et de l'appareil utilisé. La quantification individuelle de chacun des composés présents étant impossible, l'analyse quantitative se fait habituellement par familles, en utilisant des composés de référence spécifiques à chaque famille. La pureté des solvants employés est très importante pour la détection des COV dans l'air intérieur. Si on applique la désorption thermique, la pureté des gaz est importante elle aussi.

La détection des pesticides

Pour détecter les pesticides présents dans l'air intérieur, on a le plus souvent recours à des méthodes qui consistent à prélever des échantillons sur des adsorbants solides, ce qui n'exclut pas d'utiliser des barboteurs ou des systèmes mixtes. L'adsorbant solide le plus communément employé était le polymère poreux Chromosorb 102, mais on tend à lui préférer aujourd'hui les mousses de polyuréthane qui sont capables de capter un plus grand nombre de pesticides. Les méthodes d'analyse varient en fonction du pesticide et de la méthode de prélèvement. Généralement, l'analyse s'effectue par chromatographie en phase gazeuse avec différents détecteurs spécifiques allant de la capture d'électrons à la spectrométrie de masse, qui recèle d'énormes possibilités pour l'identification des composés. L'analyse des composés présente certaines difficultés liées notamment à la contamination des éléments en verre des appareils de prélèvement par des traces de diphényles polychlorés, de phtalates ou de pesticides.

La détection des matières particulaires

Il existe aujourd'hui, pour l'échantillonnage et l'analyse des particules et des fibres en suspension dans l'air, toute une série de techniques et d'appareils qui sont bien adaptés à l'évaluation de la qualité de l'air intérieur. Les analyseurs permettant une analyse directe de la concentration des particules en suspension dans l'air utilisent des détecteurs de diffusion de la lumière et des méthodes qui font appel au prélèvement d'échantillons, à la granulométrie, à l'analyse pondérale et à l'examen au microscope (optique ou électronique). Ce type d'analyses nécessite un séparateur (éluviaire), tel qu'un cyclone ou un impacteur, afin d'éliminer les particules de gros calibre avant de recueillir les autres sur un filtre. Les cyclones ne peuvent toutefois traiter que de petits volumes, ce qui allonge les séances de prélèvement. Les analyseurs passifs offrent une excellente précision, mais la température ambiante les affecte et ils ont tendance à donner des valeurs trop élevées lorsque les particules sont fines.

LA CONTAMINATION BIOLOGIQUE

Brian Flammigan

Les caractéristiques et les sources de la contamination biologique de l'air intérieur

Bien que l'air des locaux intérieurs contienne toute une variété de particules d'origine biologique (bioparticules), ce sont les micro-organismes (microbes) qui, dans la plupart des locaux de travail, ont les effets les plus marqués sur la santé. L'air intérieur ne contient pas seulement des micro-organismes tels que les virus, les bactéries, les champignons et les protozoaires, mais aussi des grains de pollen, des phanères animaux et des fragments d'insectes et d'acariens, ainsi que leurs excréments (Wanner et coll., 1993). En plus des aérosols formés par ces bioparticules, on peut aussi rencontrer des composés organiques volatils (COV) provenant d'organismes vivants tels que les plantes d'intérieur et les micro-organismes.

Le pollen

Les grains de pollen contiennent des substances allergènes qui peuvent provoquer des réactions allergiques chez les individus sensibles ou atopiques; ces réactions se manifestent généralement sous la forme d'un «rhume des foins» ou d'une rhinite. On les met le plus souvent sur le compte de l'environnement extérieur; dans l'air intérieur, les concentrations de pollen sont généralement

beaucoup plus faibles qu'au dehors. C'est dans les bâtiments où les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) assurent une filtration efficace de l'air extérieur que la différence des concentrations de pollen à l'extérieur et à l'intérieur est la plus grande. Dans les locaux climatisés, les concentrations de pollen sont plus faibles que dans ceux qui sont ventilés naturellement. Les quantités de pollen pourront être plus élevées dans certains locaux de travail décorés de nombreuses plantes vertes ou dans les serres.

Les phanères

Les phanères sont de fines particules de peau, d'ongles, d'écaillures, de poils et de plumes (associées à de la salive ou à de l'urine desséchées). Elles représentent une source potentielle d'allergènes capables de provoquer des accès de rhinite ou d'asthme chez les personnes sensibilisées. Les principales sources de phanères dans les environnements intérieurs sont habituellement les chats et les chiens, mais les rats et les souris (souris domestiques, souris de laboratoire ou parasites), les hamsters, les gerbilles (une espèce de gerboise), les cochons d'Inde et les oiseaux en cage peuvent être, eux aussi, des sources d'allergies. Les phanères provenant de ces animaux, de même que des animaux de ferme ou d'agrément (les chevaux, par exemple) peuvent se déposer sur les vêtements. Les travailleurs les plus exposés aux phanères sont sans doute ceux dont l'activité s'exerce dans les élevages d'animaux, dans les laboratoires d'expérimentation animale ou dans des locaux infestés de vermine.

Les insectes

Les insectes et leurs excréments peuvent provoquer des allergies respiratoires et autres; dans la plupart des cas, cependant, il ne semble pas qu'ils contribuent de manière significative à la contamination ambiante. Les particules provenant des blattes (en particulier, *Blattella germanica* et *Periplaneta americana*) peuvent être abondantes dans les milieux de travail insalubres, chauds et humides. L'exposition aux particules des blattes et des autres insectes, y compris les criquets, les charançons, les escarbots de la farine et les mouches à fruits, peut être la cause de problèmes de santé chez les personnes qui travaillent dans des élevages d'animaux ou dans certains laboratoires.

Les acariens

Ces arachnides sont surtout associés à la poussière, mais des fragments provenant de cette famille microscopique d'araignées et de leurs excréments (fèces) peuvent aussi être présents dans l'air intérieur. L'espèce la plus courante est l'acarien de la poussière domestique, *Dermatophagoides pteronyssinus*. Il constitue, avec sa famille, une cause importante d'allergies respiratoires. Il se développe surtout dans les locaux d'habitation; on le trouve fréquemment dans la literie, mais aussi dans les meubles rembourrés. Fort heureusement, ce type d'ameublement ne pullule pas dans les bureaux. En revanche, les acariens intéressés par la nourriture entreposée et les aliments pour animaux, tels qu'*Acarus*, *Glyciphagus* et *Tyrophagus*, peuvent sécréter des fragments allergènes dans l'air intérieur. Les agriculteurs et les personnes affectées au conditionnement des produits alimentaires sont particulièrement exposés au risque. Enfin, certains acariens, comme *D. pteronyssinus*, se complaisent dans la poussière des bâtiments, en particulier dans les endroits chauds et humides.

Les virus

Les virus sont des micro-organismes très importants si l'on tient compte du nombre de problèmes de santé qu'ils peuvent engendrer, mais ils ne peuvent vivre en dehors des cellules et des tissus vivants. Si certains virus sont présents dans l'air recyclé par les systèmes de ventilation et de climatisation, leur principal mode de

transmission se fait par contact de personne à personne. Le fait d'inhaler de près des aérosols produits par une toux ou un éternuement, par exemple, est une source importante de rhume et de grippe. Les infections seront donc forcément plus répandues dans les locaux qui connaissent un taux d'occupation élevé. On imagine mal, cependant, ce qui pourrait être fait au stade de la conception d'un bâtiment ou dans sa gestion pour remédier à cet état de choses.

Les bactéries

On classe ce type de micro-organismes en deux grandes catégories selon leur réaction à la coloration par la méthode de Gram. Les types les plus courants de Gram+ sont ceux qui proviennent de la bouche, du nez, de l'oropharynx et de la peau, à savoir: *Staphylococcus epidermidis*, *S. aureus* et les espèces *Aerococcus*, *Micrococcus* et *Streptococcus*. En général, les bactéries Gram- sont peu nombreuses, alors qu'il peut y avoir beaucoup de bactéries des espèces *Actinobacter*, *Aeromonas*, *Flavobacterium* et, en particulier, *Pseudomonas*. On peut trouver l'espèce responsable de la maladie des légionnaires, *Legionella pneumophila*, dans les canalisations d'eau chaude et dans les humidificateurs des systèmes de climatisation, ainsi que dans les appareils thérapeutiques respiratoires, les jacuzzis, les bains bouillonnants et les cabines de douche. Elle est dispersée par ces installations sous forme d'aérosols aqueux, mais peut aussi pénétrer dans les bâtiments par les aérosols émis par les tours aéro-réfrigérantes se trouvant à proximité. Le temps de survie de *L. pneumophila* dans l'air intérieur ne dépasse normalement pas quinze minutes.

En plus de la bactérie unicellulaire déjà mentionnée, il existe aussi des types filamenteux qui produisent des spores qui se dispersent dans l'air, à savoir des actinomycètes. Ils sont généralement associés à des matériaux à structures humides et peuvent émettre une odeur de terre caractéristique. Deux de ces bactéries capables de se développer à 60 °C, soit *Faenia rectivirgula* (appelée autrefois *Micropolyspora faeni*) et *Thermoactinomyces vulgaris*, se réfugient dans les humidificateurs et autres équipements des installations CVC.

Les champignons

Les champignons se divisent en deux groupes: les levures et les moisissures dénommées microfungi d'un côté et, de l'autre, les champignons du plâtre et du bois pourri, connus sous le terme de macrofungi, car ils produisent des spores macroscopiques visibles à l'œil nu. À part les levures unicellulaires, les champignons colonisent des substrats sous la forme de réseaux (mycélium) de filaments (hyphes). Ces champignons filamenteux produisent de nombreuses spores qui se dispersent dans l'air à partir de structures microscopiques sporifères (dans les moisissures) et de grandes structures sporifères (pour les macrofungi).

On trouve les spores de nombreuses moisissures différentes dans l'air des locaux d'habitation et des lieux de travail non industriels; les plus courantes font généralement partie des espèces *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* et *Eurotium*. Certaines moisissures de l'air intérieur, telles que *Cladosporium spp.*, abondent à la surface des feuilles et sur d'autres parties des plantes à l'extérieur, en particulier en été. Cependant, bien que certaines spores contenues dans l'air intérieur puissent provenir du dehors, *Cladosporium* peut aussi se développer et produire des spores sur les surfaces humides à l'intérieur, et s'ajouter par conséquent à la charge biologique de l'air intérieur. On estime généralement que les différentes espèces de *Penicillium* prennent naissance à l'intérieur, comme *Aspergillus* et *Eurotium*. On trouve des levures dans la plupart des échantillons d'air intérieur, parfois même en grandes quantités. Les levures roses *Rhodotorula* ou *Sporobolomyces* prédominent dans la flore portée par le vent; on les trouve aussi sur les surfaces couvertes de moisissures.

Les bâtiments offrent toutes sortes d'abris dans lesquels peuvent se loger les éléments organiques morts qui servent de nutriment à la plupart des champignons et des bactéries et leur permettent de se développer et de produire leurs spores. On trouve ces nutriments dans des matériaux tels que le bois, le papier, la peinture et d'autres revêtements de surface, dans les tapis et les meubles rembourrés, dans la terre des plantes en pots, dans la poussière, dans les squames cutanées et les sécrétions des êtres humains et d'autres animaux, ainsi que dans les aliments, cuits ou crus. Champignons et bactéries s'y développeront s'ils y trouvent suffisamment d'humidité. Les bactéries ne peuvent pousser que sur des surfaces saturées ou dans l'eau des bacs de récupération et des réservoirs des installations CVC. Certaines moisissures nécessitent elles aussi des conditions proches de la saturation alors que d'autres, moins exigeantes, peuvent proliférer sur des matériaux humides, mais non saturés. La poussière est aussi un réceptacle possible; lorsqu'elle est suffisamment humide, elle peut favoriser le développement de moisissures et constituer une source importante de spores qui se mêlent à l'air lorsqu'on la déplace.

Les protozoaires

Les protozoaires tels qu'*Acanthamoeba* et *Negleria* sont des organismes unicellulaires microscopiques qui se nourrissent de bactéries et autres matières organiques présentes dans les humidificateurs, les réservoirs et les bacs de récupération des installations CVC. Des particules de ces protozoaires peuvent se trouver en suspension dans l'air et, semble-t-il, être à l'origine de la fièvre des humidificateurs.

Les composés organiques volatils d'origine microbienne

Les composés organiques volatils microbiens (COVM) sont extrêmement variés de par leur composition chimique et leur odeur. Certains sont constitués d'un grand nombre de micro-organismes, alors que d'autres se limitent à certaines espèces particulières. L'alcool dit du champignon — 1-octén-3-ol (qui a une odeur de champignons frais) — fait partie des composés organiques comprenant de nombreuses moisissures différentes. Parmi les autres composés volatils de moisissures moins courants, on trouve le 3,5-diméthyl-1,2,4-trithiolone (à l'odeur fétide), la géosmine, ou 1,10-diméthyl-*trans*-9-décàl (à l'odeur de terre), et le 6-pentyl- α -pyrone (à l'odeur de noix de coco ou de moisi). Parmi les bactéries, les espèces de *Pseudomonas* produisent des pyrazines à l'odeur de pomme de terre pourrie. L'odeur de chacun de ces micro-organismes est le produit d'un mélange complexe de COVM.

Bref historique des problèmes liés à la qualité microbiologique de l'air des locaux intérieurs

Il y a plus de cent ans que l'on procède à l'étude microbiologique de l'air des locaux d'habitation, des écoles et autres bâtiments. Les premiers travaux portaient en général sur la «pureté» microbiologique relative de l'air dans différents types de bâtiments, et sur le rapport qu'elle pouvait avoir avec le taux de mortalité de leurs occupants. En liaison avec l'intérêt que suscite depuis longtemps la propagation des agents pathogènes dans les hôpitaux, le développement d'appareils volumétriques modernes pour effectuer des prélèvements microbiologiques de l'air a conduit, durant les années quarante et cinquante, à étudier de façon systématique les micro-organismes présents dans l'air des hôpitaux, puis à entreprendre des recherches sur les moisissures allergènes connues contenues dans l'air des locaux d'habitation et des établissements publics ainsi que dans l'air extérieur. Au cours des années cinquante et soixante, d'autres travaux ont porté sur les maladies respiratoires d'origine professionnelle telles que le poumon du fermier, la maladie des travailleurs du malt et la byssinose des travailleurs du coton. Bien que le premier cas de fièvre des humidificateurs de type grippal détectée chez un groupe de travailleurs

ait été décrit en 1959, ce n'est que dix à quinze années plus tard que de nouveaux cas ont été signalés. On ignore, aujourd'hui encore, la cause de cette affection, mais on suspecte, malgré l'absence de preuves formelles, certains micro-organismes qui pourraient être également à l'origine du syndrome des bâtiments malsains.

Bien que les propriétés allergènes des champignons soient bien connues, ce n'est qu'en 1988 que l'on a fait état de pathologies dues à l'inhalation de toxines fongiques sur un lieu de travail non industriel, en l'occurrence un hôpital du Québec (Mainville et coll., 1988). Les symptômes d'une fatigue extrême observés alors parmi le personnel furent mis sur le compte des mycotoxines trichothécène contenues dans les spores de *Stachybotrys atra* et de *Trichoderma viride*. Depuis lors, le «syndrome de fatigue chronique» dû à l'exposition à des poussières mycotoxiques a été diagnostiqué chez des professeurs et des employés d'un collège. Certaines de ces spores ont été à l'origine d'une pathologie suivie de séquelles de nature allergique ou de type toxique (Johanning, Morey et Jarvis, 1993). D'autres études épidémiologiques ont montré que l'appareil respiratoire peut être affecté par un ou plusieurs facteurs non allergènes associés à des champignons. A cet égard, les mycotoxines produites par certaines espèces de moisissures peuvent jouer un rôle important, mais il est possible également que les troubles respiratoires constatés soient liés à certaines caractéristiques plus générales des champignons inhalés.

Les micro-organismes associés à une mauvaise qualité de l'air intérieur et leurs effets sur la santé

Bien que les agents pathogènes soient relativement rares dans l'air intérieur, de nombreux rapports établissent un lien entre les micro-organismes véhiculés dans l'air et certaines allergies telles que la dermatite allergique atopique, la rhinite, l'asthme, la fièvre des humidificateurs et l'alvéolite allergique extrinsèque (AAE), également connue sous le nom de pneumopathie d'hypersensibilité.

On considère généralement que les champignons présents dans les bioaérosols contenus dans l'air intérieur sont plus importants que les bactéries. Du fait qu'ils apparaissent sur les surfaces humides sous forme de taches de moisissure bien visibles, ils sont révélateurs des risques potentiels pour la santé que présente l'humidité dans un bâtiment. Le développement des moisissures contribue quantitativement et qualitativement à la constitution de la flore de moisissures qui ne se trouverait pas autrement dans l'air intérieur. De même que les bactéries Gram- et les actinomycètes, les champignons hydrophiles sont des indicateurs de sites à forte humidité (visible ou cachée) où la qualité de l'air intérieur est donc mauvaise. Il s'agit en particulier de *Fusarium*, de *Phoma*, de *Stachybotrys*, de *Trichoderma*, de *Ulocladium* et des levures et, plus rarement, de pathogènes opportunistes tels qu'*Aspergillus fumigatus* et *Exophiala jeanselmei*. De fortes concentrations de moisissures ayant divers degrés de xérophilie peuvent, du fait qu'elles ont de plus faibles besoins en eau, être le signe de sites d'amplification moins humides, mais néanmoins propices à leur développement. Les moisissures abondent dans la poussière domestique, et un grand nombre d'entre elles peuvent aussi être la marque d'une atmosphère poussiéreuse. Cela va des espèces *Cladosporium* légèrement xérophiles jusqu'aux espèces très xérophiles telles qu'*Aspergillus penicillioides*, *Eurotium* et *Wallemia*, en passant par des espèces modérément xérophiles telles qu'*Aspergillus versicolor*, *Penicillium*, *P. aurantiogriseum* et *P. chrysogenum*.

Les pathogènes fongiques sont rares dans l'air intérieur, mais *A. fumigatus* et certains autres micro-organismes opportunistes du type *Aspergillus*, capables d'envahir les tissus humains, peuvent se développer dans la terre des plantes en pots tandis qu'*Exophiala jeanselmei* peut se développer dans les canalisations. Bien que leurs spores et celles d'autres pathogènes opportunistes tels que *Fusarium solani* et *Seudallescheria boydii* soient inoffensives chez les person-

nes en bonne santé, elles peuvent être dangereuses pour celles qui présentent un déficit immunitaire.

Les champignons véhiculés par l'air sont une cause de maladies allergiques beaucoup plus importante que les bactéries, bien qu'il semble qu'en Europe, tout au moins, les allergènes fongiques soient moins nocifs à cet égard que le pollen, les acariens de la poussière domestique et les phanères animaux. On a vu qu'un grand nombre de champignons sont allergènes. Le tableau 44.14 énumère quelques champignons présents dans l'air intérieur qui sont le plus souvent cités comme facteurs de rhinite ou d'asthme. Certaines espèces d'*Eurotium* et d'autres moisissures extrêmement xérophiles de la poussière domestique jouent sans doute un rôle plus important dans l'étiologie des cas de rhinite et d'asthme qu'on ne le pensait jusqu'ici. La dermatite allergique due aux champignons est beaucoup moins fréquente que la rhinite et l'asthme que peuvent provoquer *Alternaria*, *Aspergillus* ou *Cladosporium*. Certains cas relativement rares d'alvéolite allergique extrinsèque ont été attribués à toute une série de champignons allant de la levure *Sporobolomyces* au macrofungus du bois pourri *Serpula* (voir tableau 44.15). On estime généralement que pour que se manifestent des symptômes d'AAE, il faut que l'individu ait été exposé à au moins un million de spores par m³ d'air, mais probablement à plus de cent millions de spores contenant des allergènes. De tels niveaux de contamination ne se produisent dans un bâtiment qu'en cas de croissance fongique extrêmement abondante.

Comme on l'a vu, il est potentiellement dangereux d'inhaler les spores d'espèces toxigènes (Sorenson, 1989; Miller, 1993). Les spores de *Stachybotrys* ne sont pas les seules à contenir des concentrations élevées de mycotoxines. Bien que les spores de cette moisissure — qui se développe sur les papiers peints et autres substrats celluloseux dans les bâtiments humides, et qui est, elle aussi, allergène — contiennent des mycotoxines extrêmement puissantes, on trouve souvent dans l'air intérieur d'autres moisissures toxigènes, parmi lesquelles *Aspergillus* (particulièrement *A. versicolor*) et *Penicillium* (*P. aurantiogriseum* et *P. viridicatum*) ainsi que *Trichoderma*. Les expériences qui ont été faites montrent qu'un certain nombre de mycotoxines contenues dans les spores de ces moisissures sont immunosuppressives et qu'elles inhibent fortement la fonction d'épuration et les autres fonctions des cellules macrophages pulmonaires qui sont essentielles à l'hygiène respiratoire (Sorenson, 1989).

On sait peu de choses des effets sur la santé des COVM formés pendant la croissance et la sporulation des moisissures ou de leurs homologues bactériens. Bien que de nombreux COVM ne soient que faiblement toxiques (Sorenson, 1989), il semble qu'ils puissent provoquer chez l'humain des maux de tête, une sensation de gêne et même des réactions respiratoires aiguës.

Les bactéries contenues dans l'air intérieur ne sont en principe pas dangereuses, car la flore est généralement surtout composée des bactéries Gram+ présentes dans la peau et les voies aériennes supérieures. Toutefois, si le compte de ces bactéries est très élevé, cela signifie que les locaux sont surpeuplés et insuffisamment ventilés. La présence d'un grand nombre de bactéries Gram- ou d'actinomyètes dans l'air prouve qu'il y a dans le bâtiment des surfaces ou des matériaux très humides, des canalisations et, en particulier, des humidificateurs où ces micro-organismes prolifèrent. On a pu démontrer que certaines bactéries Gram- (ou les endotoxines extraites de leurs parois) provoquent les symptômes de la fièvre des humidificateurs. Dans certains cas, leur croissance dans les humidificateurs est telle qu'elle peut générer des aérosols contenant suffisamment de cellules allergènes pour être à l'origine de symptômes aigus d'AAE semblables à ceux d'une pneumonie grave (voir tableau 44.15).

Il est rare, mais néanmoins possible que des bactéries pathogènes telles que *Mycobacterium tuberculosis* qui sont présentes dans les noyaux de condensation de personnes infectées passent dans l'air

Tableau 44.14 • Types de champignons présents dans l'air intérieur pouvant être la cause de rhinites ou d'asthme

<i>Alternaria</i>	<i>Geotrichum</i>	<i>Serpula</i>
<i>Aspergillus</i>	<i>Mucor</i>	<i>Stachybotrys</i>
<i>Cladosporium</i>	<i>Penicillium</i>	<i>Stemphylium/Ulocladium</i>
<i>Eurotium</i>	<i>Rhizopus</i>	<i>Wallemia</i>
<i>Fusarium</i>	<i>Rhodotorula/Sporobolomyces</i>	

recyclé et soient entraînées dans toutes les parties d'un milieu confiné. Bien que la bactérie pathogène *Legionella pneumophila* ait été isolée dans des humidificateurs et des systèmes de climatisation et de conditionnement d'air, la plupart des épidémies de légionellose ont été associées à des aérosols provenant de tours aéro-réfrigérantes ou de douches.

L'influence des modifications apportées à la conception des bâtiments

Au fil des ans, l'augmentation de la taille des bâtiments et le développement des systèmes de traitement de l'air (climatisation, etc.) se sont traduits par des changements à la fois quantitatifs et qualitatifs de la charge biologique de l'air dans les locaux professionnels. Au cours des vingt dernières années, la tendance à concevoir des bâtiments peu gourmands en énergie a conduit à construire des immeubles étanches à l'air qui favorisent la prolifération des micro-organismes et d'autres aérocontaminants. Dans des bâtiments aussi hermétiques, la vapeur d'eau, qui auparavant eût été refoulée à l'extérieur, se condense sur les surfaces froides, créant ainsi des milieux de prolifération microbienne. De plus, les

Tableau 44.15 • Micro-organismes présents dans l'air intérieur pouvant être la cause d'alvéolites allergiques extrinsèques

Type	Micro-organisme	Source
Bactéries	<i>Bacillus subtilis</i>	Bois pourri
	<i>Faenia rectivirgula</i>	Humidificateurs
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Humidificateurs
	<i>Thermoactinomyces vulgaris</i>	Climatiseurs
Champignons	<i>Aureobasidium pullulans</i>	Saunas; murs et parois
	<i>Cephalosporium sp.</i>	Fondations; humidificateurs
	<i>Cladosporium sp.</i>	Salles de bains non ventilées
	<i>Mucor sp.</i>	Systèmes de chauffage à air pulsé
	<i>Penicillium sp.</i>	Systèmes de chauffage à air pulsé; humidificateurs
	<i>P. casei</i>	Murs et parois
	<i>P. chrysogenum/P. cyclopium</i>	Planchers
	<i>Serpula lacrimans</i>	Pourriture sèche des bois de charpente
	<i>Sporobolomyces</i>	Murs et parois; plafonds
	<i>Trichosporon cutaneum</i>	Bois; nattes

installations CVC conçues uniquement dans un souci d'efficacité économique favorisent elles aussi le développement microbien et exposent les occupants des grands immeubles à des risques pour leur santé. Ainsi, les humidificateurs qui utilisent de l'eau recyclée sont vite contaminés et se transforment en générateurs de micro-organismes. Les brumisateurs d'eau produisent des aérosols chargés de micro-organismes; le fait de placer les filtres en amont et non en aval de ces sources de production microbienne favorise la transmission d'aérosols microbiens vers les locaux de travail. L'installation de prises d'air frais à proximité des tours aéro-réfrigérantes et d'autres sources de micro-organismes, ainsi que la difficulté d'accès aux systèmes de climatisation pour les travaux d'entretien, de nettoyage et de désinfection sont autant de défauts de conception qui peuvent constituer un danger pour la santé des occupants, exposés à d'importantes quantités de micro-organismes véhiculés par l'air.

Les méthodes d'évaluation de la qualité de l'air des locaux intérieurs

Les prélèvements de micro-organismes dans l'air

Lorsqu'on analyse la flore microbienne présente dans l'atmosphère d'un bâtiment pour tenter, par exemple, d'établir la cause des troubles dont se plaignent ses occupants, il importe de collecter des données objectives à la fois précises et fiables. Si l'on part du principe que l'état microbiologique de l'air intérieur devrait refléter celui de l'air extérieur (ACGIH, 1989), il y a lieu d'identifier avec précision les micro-organismes qu'il contient et de les comparer à ceux présents dans l'air extérieur au même moment.

Les échantillonneurs d'air

Les méthodes de prélèvement qui permettent, directement ou indirectement, de cultiver des bactéries et des champignons viables sur une gélose nutritive sont celles qui offrent les meilleures chances d'identifier les espèces présentes; ce sont elles, dès lors, qui sont le plus souvent utilisées. Le milieu gélosé est mis en incubation jusqu'à ce que les colonies se développent à partir des bioparticules piégées et qu'elles puissent être identifiées et comptées, ou repiquées sur d'autres milieux pour examen ultérieur. Les milieux gélosés nécessaires aux bactéries diffèrent de ceux des champignons et certaines bactéries, *Legionella pneumophila*, par exemple, ne peuvent être isolées que sur des milieux sélectifs spéciaux. Pour les champignons, il est recommandé d'utiliser deux milieux: l'un standard et un autre plus sélectif pour l'isolement des champignons xérophiles. L'identification, basée sur les caractéristiques brutes des colonies ou sur leurs caractéristiques microscopiques ou biochimiques, exige un personnel très qualifié et expérimenté.

Toute la panoplie des méthodes de prélèvement disponibles a fait l'objet de nombreux articles (Flannigan, 1992; Wanner et coll., 1993, par exemple) et il ne sera fait mention ici que des systèmes les plus couramment utilisés. On peut se contenter d'une évaluation sommaire en recueillant passivement des micro-organismes par sédimentation dans des boîtes de Pétri ouvertes contenant un milieu gélosé. Les résultats que l'on obtient ne sont pas volumétriques; ils sont fortement dépendants des turbulences atmosphériques et cette méthode favorise la collecte de grandes (lourdes) spores ou de grappes de spores/cellules. Il est donc préférable d'employer un échantillonneur d'air volumétrique. Les impacteurs dans lesquels les particules véhiculées par l'air entrent en collision avec une surface gélosée sont très utilisés. L'air traverse une fente pratiquée au-dessus d'une boîte de gélose en rotation (impacteur à fente) ou un disque perforé placé au-dessus de la boîte (impacteur à tamis). Les échantillonneurs à tamis à un étage sont très utilisés, mais certains chercheurs leur préfèrent l'échantillonneur d'Andersen à six étages. L'air passe en cascades

successives à travers des orifices de plus en plus petits, et les particules se déposent sur six boîtes de gélose en fonction de leur diamètre aérodynamique. Après incubation de ces boîtes, il est possible de déterminer la taille des particules qui donnent lieu au développement des colonies et de préciser ainsi les sites de l'appareil respiratoire où les micro-organismes vont probablement se déposer. L'échantillonneur centrifuge de Reuter, d'usage courant, fonctionne selon un principe différent. L'accélération imprimée à l'air sous l'action des pales d'un ventilateur précipite les particules à grande vitesse sur la gélose déposée sur une bandelette plastique placée à l'intérieur du cylindre de l'appareil.

Une autre méthode de prélèvement consiste à collecter les micro-organismes sur un filtre à membrane à l'intérieur d'une boîte reliée à une petite pompe rechargeable de faible volume. L'appareil peut être fixé à la ceinture ou à un harnais de façon à recueillir un échantillon individuel pendant la durée d'une journée de travail. Ce prélèvement effectué, on ensemence de petites quantités de lavages du filtre, ainsi que des dilutions de ces lavages sur divers milieux gélosés qui sont ensuite incubés, et on compte alors les micro-organismes viables. Une variante de cette méthode est l'impacteur en milieu liquide, dans lequel les particules entraînées par l'air sont aspirées par des tuyères et recueillies dans le liquide. Une partie du liquide collecté et des dilutions préparées à partir de ce liquide sont traitées de la même manière que les prélèvements provenant des échantillonneurs à filtre.

Ces méthodes de prélèvement d'échantillons «viables» ont le grave défaut de n'évaluer que les organismes que l'on peut cultiver; or, ceux-ci peuvent ne représenter que 1 à 2% de l'ensemble de la flore aérienne. Il est possible, néanmoins, d'effectuer des comptages totaux (organismes viables et non viables) à l'aide d'impacteurs dans lesquels les particules sont recueillies sur des supports tournants à surface adhésive, sur une plaque de matière plastique ou encore sur la lame de verre du microscope des différents modèles d'impacteurs à fente. Les comptages se font au microscope, mais un petit nombre seulement de champignons peuvent être identifiés de cette manière, à savoir ceux qui ont des spores distinctives. Le prélèvement par filtration est utilisé pour l'évaluation des micro-organismes viables; c'est aussi un moyen de procéder à un comptage total. On peut colorer une partie des lavages ensemencés sur le milieu gélosé, puis compter les micro-organismes au microscope. On peut aussi, de la même manière, procéder à des comptages totaux à partir du liquide collecté par l'impacteur en milieu liquide.

Le choix de l'échantillonneur et la stratégie de prélèvement

Le choix de l'échantillonneur est largement fonction de l'expérience du chercheur, mais il est également motivé par des raisons à la fois qualitatives et quantitatives. Ainsi, les boîtes de gélose des impacteurs à un seul étage sont beaucoup plus facilement «surchargées» de spores pendant le prélèvement de l'échantillon que celles de l'échantillonneur à six étages, ce qui conduit à un envahissement des boîtes incubées et à d'importantes erreurs quantitatives et qualitatives lors de l'évaluation de la population véhiculée par l'air. La façon dont fonctionnent les échantillonneurs, leur temps de prélèvement et l'efficacité avec laquelle ils captent différents calibres de particules puis les extraient du flux d'air pour les recueillir sur une surface ou dans un liquide varient énormément. On ne peut comparer valablement les données obtenues par un chercheur utilisant un certain type d'échantillonneur à celles d'un autre expérimentateur se servant d'un modèle différent. La stratégie de prélèvement et le choix de l'échantillonneur sont essentiels. Il n'existe cependant pas de stratégie générale de prélèvement (Wanner et coll., 1993). L'un des grands problèmes qui se posent est celui de la répartition des micro-organismes dans l'air intérieur, qui varie constamment dans l'espace et dans le temps. Elle dépend en effet très largement du niveau d'activité dans le local étudié,

surtout lorsqu'on y effectue des travaux de nettoyage ou de construction qui soulèvent de la poussière. C'est la raison pour laquelle on observe d'importantes variations dans les quantités recueillies durant des intervalles de temps relativement courts. A part les échantillonneurs à filtre et les impacteurs en milieu liquide qui peuvent fonctionner plusieurs heures durant, la plupart des échantillonneurs sont conçus pour capter l'échantillon en l'espace de quelques minutes seulement. Les échantillons devraient donc être prélevés dans toutes les conditions d'occupation et d'utilisation, y compris pendant les périodes de marche et d'arrêt des systèmes de CVC. Même si des prélèvements répétés peuvent révéler toute la gamme des concentrations de spores viables se trouvant dans un environnement intérieur donné, il n'est pas possible d'évaluer de façon satisfaisante la façon dont les individus sont exposés aux micro-organismes dans cet environnement. Même les échantillons prélevés pendant une journée de travail entière grâce à un échantillonneur individuel à filtre n'en donnent pas une image exacte, car ils ne fournissent qu'une valeur moyenne et n'indiquent pas les pics d'exposition.

Les recherches épidémiologiques ont montré qu'il peut exister, en plus des effets bien connus de quelques allergènes, des facteurs non allergènes associés aux champignons qui affectent la santé respiratoire. Les mycotoxines produites par certaines espèces de moisissures peuvent jouer un grand rôle, mais il est possible aussi que d'autres facteurs de caractère général soient impliqués. On peut donc prévoir que les recherches sur la contamination fongique de l'air intérieur se feront dorénavant selon la démarche suivante: 1) détermination des espèces allergènes et toxigènes présentes, en procédant à l'échantillonnage des champignons viables; et 2) mesurage de la quantité totale de champignons à laquelle chaque individu est exposé dans un milieu professionnel donné. Comme on l'a vu, on pourrait obtenir ce genre d'information par des comptages totaux effectués tout au long d'une journée de travail. Il est toutefois probable que, dans un proche avenir, on fera sans doute plus largement appel aux méthodes récemment développées pour le dosage du 1,3- β -glucan ou de l'ergostérol (Miller, 1993). Ces deux substances sont des composants structuraux des champignons; elles donnent donc la mesure de leur quantité (leur biomasse, par exemple). Un lien a été mis en évidence entre les niveaux de 1,3- β -glucan dans l'air intérieur et les symptômes du syndrome des bâtiments malsains (Miller, 1993).

Les normes et les directives

Bien qu'un certain nombre d'organismes aient établi un classement des niveaux de contamination de l'air et de la poussière des locaux intérieurs (voir tableau 44.16), les difficultés de prélèvement et d'analyse font que l'on hésite, avec quelque raison, à fixer des normes chiffrées ou des valeurs de référence. On a déjà relevé que le nombre des particules microbiennes véhiculées par l'air dans les bâtiments climatisés est en général nettement inférieur à ce qu'il est à l'extérieur, et que l'écart est moins marqué entre les bâtiments à ventilation naturelle et l'air extérieur. La Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) (ACGIH, 1989) recommande d'utiliser l'ordre d'importance des espèces fongiques de l'air intérieur et de l'air extérieur pour interpréter les données fournies par les prélèvements d'air. Le fait que certaines moisissures soient présentes ou prépondérantes dans l'air intérieur, alors qu'elles ne le sont pas à l'extérieur, pourra permettre de déceler un problème à l'intérieur d'un bâtiment. Par exemple, l'abondance dans l'air intérieur de moisissures hydrophiles telles que *Stachybotrys atra* est presque toujours le signe d'un site d'amplification très humide.

Bien que certains organismes influents tels que le Comité des bioaérosols de l'ACGIH n'aient pas fixé de directives chiffrées en la matière, un guide canadien relatif aux immeubles à usage de

Tableau 44.16 • Concentrations de micro-organismes dans l'air et la poussière d'environnements intérieurs non industriels

Catégorie de contamination	UFC ^a par m ³ d'air		Champignons en UFC/g de poussière
	Bactéries	Champignons	
Très faible	< 50	< 25	< 10 000
Faible	< 100	< 100	< 20 000
Intermédiaire	< 500	< 500	< 50 000
Élevée	< 2 000	< 2 000	< 120 000
Très élevée	> 2 000	> 2 000	> 120 000

^a UFC: unités formant colonie.

Source: d'après Wanner et coll., 1993.

bureaux (Nathanson, 1993) formule, sur la base de cinq années d'enquêtes menées dans près de 50 établissements publics climatisés, un certain nombre de recommandations dont voici les points essentiels:

1. La flore aérienne «normale» de l'air intérieur devrait être quantitativement plus faible que celle de l'air extérieur, mais qualitativement semblable.
2. La présence dans les échantillons prélevés à l'intérieur d'une ou de plusieurs espèces de champignons en quantités importantes, alors qu'il n'y en a pas dans les échantillons prélevés à l'extérieur, est la preuve de l'existence d'un amplificateur intérieur.
3. Certains champignons pathogènes tels qu'*Aspergillus fumigatus*, *Histoplasma* et *Cryptococcus* ne devraient pas être présents en quantités importantes.
4. La persistance en quantités importantes de moisissures toxigènes telles que *Stachybotrys atra* et *Aspergillus versicolor* exige que l'on procède à une enquête et que des mesures soient prises.
5. Si l'on trouve plus de 50 unités formant colonie par m³ (UFC/m³), il y a lieu de s'inquiéter lorsqu'elles appartiennent à une seule et même espèce (à part certains champignons courants qui vivent sur les feuilles à l'extérieur); lorsque leur nombre ne dépasse pas 150 UFC/m³, la situation est acceptable à condition que les espèces présentes reflètent celles de la flore extérieure; jusqu'à 500 UFC/m³, elle est acceptable en été s'il s'agit essentiellement de champignons qui vivent sur des feuilles à l'extérieur.

Ces valeurs sont fondées sur des échantillons d'air prélevés en quatre minutes au moyen d'un échantillonneur centrifuge de Reuter. Elles ne sauraient être extrapolées à d'autres techniques d'échantillonnage, d'autres types de bâtiments ou d'autres régions climatiques ou géographiques. On ne peut fixer une norme ou un niveau acceptable que sur la base d'enquêtes détaillées effectuées dans un certain nombre de bâtiments dans une région donnée et au moyen de procédures bien définies. Il n'est possible d'établir une valeur limite ni pour une exposition aux moisissures en général ni pour certaines espèces en particulier.

La lutte contre les micro-organismes dans les environnements intérieurs

L'eau est l'élément clé du développement microbien et de la production de cellules et de spores en suspension dans les environnements intérieurs. C'est donc en réduisant les sources d'humidité, plutôt qu'en ayant recours à des biocides, que l'on peut espérer maîtriser leur développement. Il faut pour cela assurer une main-

tenance attentive et procéder aux réparations indispensables pour assécher rapidement les locaux en cas de fuite d'eau et éliminer les causes de ces fuites (Morey, 1993a). On considère en général que le taux d'humidité d'un local ne devrait pas dépasser 70%; toutefois, ce taux n'est valable que si la température des murs et des autres surfaces est plus ou moins égale à celle de l'air ambiant. Lorsque les murs sont mal isolés, leur température superficielle peut être inférieure au point de rosée et la condensation risque alors de provoquer la croissance de champignons hydrophiles et même de bactéries (Flannigan, 1993). C'est ce qui se produit dans les climats tropicaux lorsque l'air humide s'infiltré dans un bâtiment climatisé et se condense sur la surface plus fraîche de l'intérieur des murs (Morey, 1993b). Dans ce cas, seules une bonne isolation et une bonne utilisation des barrières vapeur peuvent résoudre la question. Outre des mesures rigoureuses de contrôle de l'humidité, il convient d'appliquer des programmes stricts de maintenance et de nettoyage afin d'éliminer la poussière et les débris dont se nourrissent les micro-organismes et qui leur offrent un gîte.

Dans les installations CVC (Nathanson, 1993), il faut éviter que de l'eau ne stagne dans les bacs de récupération ou sous les serpentins de refroidissement. Lorsque des pulvérisateurs, des mèches ou des réservoirs d'eau chaude font partie intégrante des systèmes d'humidification des CVC, une désinfection et un nettoyage réguliers sont indispensables si l'on veut éviter le développement microbien. L'humidification par vapeur sèche est un bon moyen de limiter ce risque. Comme les filtres captent la saleté et l'humidité et constituent par conséquent des sites d'amplification microbienne, il importe de les changer régulièrement. Les micro-organismes peuvent aussi proliférer dans les matériaux poreux d'isolation acoustique utilisés pour garnir les conduits, lorsque ces matériaux absorbent de l'humidité. La solution consiste à fixer ce genre d'isolation à l'extérieur plutôt qu'à l'intérieur; les surfaces intérieures devraient être lisses afin de ne pas constituer un milieu favorable à la prolifération des microbes. Il est possible, par des mesures de ce type, d'éviter que des espèces du genre *Legionella* ne se développent dans les installations CVC; il est bon toutefois de prévoir également des mesures additionnelles telles que l'installation de filtres HEPA à haut rendement de captage dans les prises d'air (Feeley, 1988). Il convient enfin de veiller à ce que l'eau chaude fournie dans les bâtiments soit chauffée uniformément à 60 °C, qu'il n'y ait aucune zone d'eau stagnante et qu'aucune installation ne comporte de matériaux pouvant favoriser le développement de *Legionella*.

Si l'on ne parvient pas à résoudre le problème et que des moisissures prolifèrent, un certain nombre de mesures correctives s'imposent. Il est essentiel d'enlever tous les matériaux organiques poreux (moquettes, meubles rembourrés, dalles de plafond et d'isolation, etc.) dans ou sur lesquels se développent des microbes. Les surfaces lisses devraient être lavées à l'eau de Javel ou tout autre désinfectant convenable. Les biocides pouvant produire des aérosols sont à proscrire dans les installations de CVC en service.

Pendant le traitement des locaux, on veillera à ne pas disperser en aérosols les micro-organismes se trouvant sur ou dans des matériaux contaminés. En cas de traitement de zones de moisissures importantes (10 m² ou plus), on limitera les risques en maintenant sous dépression les zones traitées et en les isolant du reste du bâtiment (Morey, 1993a, 1993b; New York City Department of Health, 1993). La poussière présente pendant les travaux de nettoyage ou produite pendant le transfert des matériaux contaminés dans des récipients scellés sera recueillie au moyen d'un aspirateur équipé d'un filtre HEPA. Ces opérations devraient être confiées à un personnel spécialisé équipé d'appareils de protection respiratoire sous forme de masques complets avec filtres HEPA, ainsi que de vêtements, chaussures et gants de protection (New York City Department of Health, 1993). Dans le cas de petits bâti-

ments, on peut faire appel au personnel d'entretien local après l'avoir convenablement formé. Dans tous les cas, les personnes qui occupent régulièrement le bâtiment ainsi que le personnel d'entretien devraient être informés des risques éventuels. Les membres du personnel d'entretien ne devraient pas souffrir d'asthme, d'allergies ou de troubles du système immunitaire (New York City Department of Health, 1993).

LA RÉGLEMENTATION, LES RECOMMANDATIONS, LES DIRECTIVES ET LES NORMES

Maria José Berenguer

Les méthodes et les critères

L'élaboration de directives et de normes applicables à l'air des locaux intérieurs est le fruit de politiques proactives menées par les organismes compétents. Dans la pratique, ces tâches sont réparties entre les nombreux services responsables de la lutte antipollution, de la protection de la santé publique, de la sécurité des produits et du contrôle de l'application de la réglementation en matière d'hygiène du travail, de police des constructions, etc.

L'objectif de la réglementation est de combattre la pollution de l'air intérieur. Ce but peut être atteint en contrôlant les sources de pollution existantes, en diluant l'air intérieur dans de l'air extérieur et en vérifiant la qualité du mélange qui en résulte. Il faut pour cela que des limites précises soient fixées pour chacun des polluants présents.

Quel que soit le polluant considéré, sa concentration dans l'air intérieur est le résultat d'un équilibre pondéral exprimé par l'équation:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q}{V} + nC_o - aC_i - nC_i$$

où:

- C_i = concentration du polluant dans l'air intérieur (en mg/m³);
- Q = taux d'émission (en mg/h);
- V = volume de l'espace intérieur (en m³);
- C_o = concentration du polluant dans l'air extérieur (en mg/m³);
- n = taux de ventilation (nombre de renouvellements de l'air intérieur) par heure;
- a = taux d'élimination du polluant par heure.

On observe généralement, dans des conditions statiques, que la concentration d'un polluant dépend, d'une part, de la quantité de polluant mis en suspension dans l'air à partir de la source de contamination et de sa concentration dans l'air extérieur et, d'autre part, des différents mécanismes d'élimination du polluant. Ces mécanismes comprennent la dilution du polluant considéré et sa «disparition» avec le temps. Toute réglementation, recommandation, directive et norme visant à limiter la pollution devra tenir compte de ces deux phénomènes.

Le contrôle des sources de pollution

L'un des meilleurs moyens d'abaisser la concentration d'un polluant dans l'air intérieur est de contrôler ses sources d'émission à l'intérieur du bâtiment, à savoir les matériaux de construction, les éléments de décoration, les activités qui s'y déroulent et les occupants eux-mêmes.

Si l'on considère qu'il est nécessaire de réglementer les émissions de polluants dues aux matériaux de construction utilisés, il

existe des normes qui limitent la teneur des composés nocifs dans ces matériaux. Certains de ces composés sont cancérogènes; c'est le cas du formaldéhyde, du benzène, de certains pesticides, de l'amiante, des fibres de verre, notamment.

Un autre moyen de contrôler ces émissions est de fixer des normes d'émission. Cette solution présente toutefois de nombreuses difficultés pratiques; les principales tiennent au fait que l'on n'est pas encore parvenu à s'entendre sur la façon de procéder pour mesurer ces émissions, que l'on connaît encore mal leurs effets sur la santé et le confort des occupants et qu'il est souvent très difficile d'identifier et de quantifier les centaines de composés qui peuvent être émis par les matériaux incriminés. L'un des moyens d'établir des normes d'émission est de fixer un niveau de concentration acceptable du polluant considéré et de calculer un taux d'émission qui tienne compte des conditions ambiantes — température, taux d'humidité, taux de renouvellement de l'air, coefficient d'occupation, etc., — c'est-à-dire qui soit représentatif de la manière dont le produit considéré est mis en œuvre. La principale critique qu'a suscité cette méthode est que des produits différents peuvent générer un même polluant. Les normes d'émissions sont généralement établies sur la base d'analyses effectuées dans des atmosphères contrôlées et dans des conditions parfaitement définies. Des directives existent pour l'Europe (COST Project 613, 1989, 1991) et les États-Unis (ASTM, 1989). Les critiques dont elles font habituellement l'objet sont: 1) qu'il est difficile d'avoir des données comparatives; et 2) qu'elles ne résolvent pas les problèmes que posent les espaces intérieurs où les polluants sont émis de façon sporadique.

En ce qui concerne les activités qui peuvent se dérouler dans un bâtiment, l'accent principal devrait être mis sur la maintenance intérieure. Le contrôle peut revêtir ici la forme d'une réglementation précisant la façon dont certaines opérations doivent être exécutées — à l'instar des recommandations sur l'usage des pesticides ou sur les limites d'exposition au plomb ou à l'amiante lors de la rénovation ou de la démolition d'un bâtiment.

La fumée de tabac imputable aux occupants d'un bâtiment est une cause particulièrement fréquente de pollution de l'air intérieur; elle mérite d'être traitée séparément. De nombreux pays ont promulgué des lois de portée nationale qui interdisent de fumer dans certains lieux publics tels que les restaurants ou les théâtres, alors que, souvent, d'autres dispositions l'autorisent dans des secteurs bien délimités.

Lorsque des interdictions d'emploi frappent certains composés ou certains matériaux, elles sont faites sur la base de ce que l'on sait de leurs effets nocifs probables sur la santé, effets que l'on connaît plus ou moins bien en ce qui concerne les concentrations que l'on rencontre habituellement à l'intérieur. Une autre difficulté tient au fait que l'on ne connaît pas très bien non plus les propriétés des composés qui pourraient leur être substitués.

L'élimination des polluants

Il est parfois impossible d'éviter les émissions de certains polluants. C'est le cas, par exemple, lorsque ces émissions proviennent des occupants du bâtiment (émissions de dioxyde de carbone et de bioeffluents, présence de matériaux aux propriétés incontrôlables, tâches quotidiennes, etc.). La seule façon de diminuer la pollution consiste dans ces cas à recourir à des systèmes de ventilation et à divers autres moyens pour purifier l'air intérieur.

La ventilation est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour diminuer la concentration de polluants dans les espaces intérieurs. Néanmoins, la nécessité d'économiser l'énergie exige qu'on limite le plus possible les prises d'air extérieur dont on a besoin pour renouveler l'air intérieur. Il existe à cet effet des normes qui fixent des taux de ventilation minimaux en fonction du volume d'air intérieur qui doit être renouvelé chaque heure à partir de l'extérieur, ou qui définissent un volume d'air minimal

par occupant ou par m³, ou encore qui considèrent la concentration du dioxyde de carbone en tenant compte des différences entre les secteurs où il y a des fumeurs et ceux où il n'y en a pas. Pour les bâtiments qui sont ventilés naturellement, des recommandations minimales ont été établies pour différents points du bâtiment, les fenêtres, par exemple.

Parmi les références les plus souvent citées par la majorité des normes existantes, aussi bien au niveau national qu'international, même si elles ne sont pas légalement obligatoires, il y a lieu de mentionner les normes que la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)) a mis au point à l'intention des milieux professionnels pour la conception de leurs installations. Ainsi, la norme ASHRAE-62-1989 (ASHRAE, 1989) spécifie le débit d'air minimal nécessaire à la ventilation d'un bâtiment et la qualité que doit avoir l'air intérieur pour préserver la santé des occupants. Pour le dioxyde de carbone (composé que la plupart des auteurs ne considèrent pas comme un polluant du fait de son origine humaine, mais que l'on utilise comme indicateur de la qualité de l'air intérieur pour contrôler le bon fonctionnement des systèmes de ventilation), la norme fixe une limite de 1 000 ppm pour satisfaire les critères de confort (odeur). Elle précise également le niveau de qualité de l'air extérieur requis pour le renouvellement de l'air intérieur.

Lorsque la source de la contamination — qu'elle soit intérieure ou extérieure — est difficile à éliminer et qu'il faut recourir à une installation spéciale, il existe des normes de rendement, comme celles qui fixent la méthode à suivre pour contrôler la performance d'un type donné de filtre.

L'application des normes d'hygiène du travail à la définition de la qualité de l'air intérieur

Il est possible d'établir différents types de valeurs de référence applicables à l'air intérieur en fonction du type de population à protéger. Ces valeurs peuvent être basées sur des normes de qualité de l'air ambiant, sur des valeurs précises visant certains polluants (tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, les composés organiques volatils, le radon, etc.), mais elles peuvent l'être aussi sur les normes que l'on utilise couramment en hygiène du travail et qui concernent exclusivement les environnements industriels. Elles ont été conçues, avant tout, pour protéger les travailleurs des effets les plus graves des polluants — comme l'irritation des muqueuses ou des voies aériennes supérieures — et pour éviter des intoxications accompagnées d'effets systémiques. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs, lorsqu'ils traitent de l'environnement intérieur, utilisent comme valeurs de référence les limites d'exposition pour les environnements industriels fixées par l'ACGIH. Ces limites sont des seuils à ne pas dépasser pour des journées de travail de huit heures et des semaines de travail de quarante heures.

On utilise des coefficients numériques pour adapter ces seuils à l'environnement intérieur. Les limites applicables à l'industrie sont généralement réduites dans un rapport de 1:2, de 1:10 ou même de 1:100, selon le type d'effet sur la santé et la population concernée. Plusieurs raisons expliquent cette façon de procéder. Les personnes qui travaillent dans un environnement non industriel sont exposées simultanément à de faibles concentrations de plusieurs composés chimiques, et cela, dans des proportions que l'on ne connaît généralement pas, mais qui pourraient avoir un effet de potentialisation difficile à maîtriser. Dans les environnements industriels, par contre, il est généralement admis que les substances dangereuses à contrôler sont connues et en nombre souvent limité, même si leurs concentrations sont d'ordinaire beaucoup plus élevées.

En outre, dans de très nombreux pays, les sites industriels sont surveillés et l'on veille au respect des normes établies, ce qui n'est

que rarement le cas pour les environnements non industriels; il peut donc se faire que l'on utilise à l'occasion, dans ceux-ci, des produits donnant naissance à des concentrations élevées sans qu'un contrôle d'ambiance ne permette de déterminer les niveaux d'exposition réels. Par ailleurs, les risques propres aux activités industrielles sont connus ou devraient l'être, et des mesures sont prises pour les diminuer ou les contrôler. Les travailleurs intéressés en sont informés, et les moyens leur sont donnés de réduire ces risques et de se prémunir contre eux. De plus, les travailleurs de l'industrie sont généralement des adultes en bonne santé et en bonne condition physique, alors que le reste de la population compte des individus souffrant de troubles pathologiques ou de handicaps d'un type ou d'un autre. Dans un bureau, par exemple, la plupart des tâches peuvent être effectuées par des gens dont les capacités physiques sont réduites ou par des personnes sensibles aux allergènes qui seraient dans l'incapacité de travailler dans maints environnements industriels. Enfin, on l'a déjà noté, les limites d'exposition, comme beaucoup d'autres normes professionnelles, sont calculées sur la base d'une exposition de huit heures par jour et de quarante heures par semaine, ce qui représente moins du quart du temps d'exposition d'une personne qui resterait continuellement dans le même environnement ou serait exposée à la même substance pendant toute la semaine, c'est-à-dire durant 168 heures. Les valeurs de référence établies pour l'industrie reposent sur des données qui tiennent compte d'expositions hebdomadaires et de périodes de non-exposition de 16 heures par jour et de 64 heures pendant les fins de semaine, ce qui rend toute extrapolation très difficile sur la base de ces données.

Plusieurs auteurs en sont donc arrivés à la conclusion que, pour pouvoir appliquer les normes d'hygiène du travail à l'évaluation de l'air intérieur, les valeurs de référence valables pour l'air des locaux non industriels devraient comporter une large imprécision. La norme ASHRAE-62-1989 recommande par conséquent de tabler, pour les polluants chimiques intérieurs qui n'ont pas encore de valeur de référence agréée, sur des concentrations représentant un dixième seulement des limites d'exposition correspondantes préconisées par l'ACGIH pour les environnements industriels.

Pour les contaminants biologiques, toutefois, il n'existe pas encore de critères techniques d'évaluation applicables aux environnements industriels ou aux espaces intérieurs. Cela tient sans doute à la nature des contaminants biologiques dont les caractéristiques sont très variables, ce qui rend difficile l'établissement de critères d'évaluation applicables en toutes circonstances. Ces caractéristiques sont notamment la capacité de reproduction de l'organisme considéré, le fait que les mêmes espèces microbiennes peuvent présenter des degrés de pathogénicité différents ou que des modifications de certains facteurs environnementaux (tels que la température ou l'humidité) peuvent affecter leur présence dans un environnement donné. En dépit de ces difficultés, le Comité des bioaérosols de l'ACGIH a élaboré des directives permettant d'évaluer ces agents biologiques dans les environnements intérieurs (ACGIH, 1989). Les protocoles préconisés par ces directives portent sur les méthodes et les stratégies d'échantillonnage, les procédures d'analyse et l'interprétation des résultats; elles comprennent également un certain nombre de recommandations quant aux mesures correctives à mettre en œuvre lorsque des données médicales ou cliniques dénotent l'existence de pathologies telles que la fièvre des humidificateurs, la pneumonie d'hypersensibilité ou des allergies liées aux contaminants biologiques. Elles peuvent aussi être appliquées lorsqu'un prélèvement est nécessaire pour établir l'importance relative de chacune des sources de bioaérosols déjà identifiés ou pour corroborer une hypothèse médicale. Ces directives ne recommandent pas d'effectuer des prélèvements de routine pour détecter les bioaérosols dans l'air.

Tableau 44.17 • Normes de qualité de l'air fixées par l'EPA

Concentrations moyennes			
Polluant	µg/m ³	ppm	Durée de l'exposition
Dioxyde de soufre	80 ^a	0,03	1 année (moyenne arithmétique)
	365 ^a	0,14	24 heures ^b
	1 300 ^c	0,5	3 heures ^b
Matière particulaire	150 ^{a,c}	—	24 heures ^d
	50 ^{a,c}	—	1 année ^d (moyenne arithmétique)
Monoxyde de carbone	10 000 ^a	9,0	8 heures ^b
	40 000 ^a	35,0	1 heure ^b
Ozone	235 ^{a,c}	0,12	1 heure
Dioxyde d'azote	100 ^{a,c}	0,053	1 année (moyenne arithmétique)
Plomb	1,5 ^{a,c}	—	3 mois

^a Norme primaire. ^b Valeur maximale à ne pas dépasser plus d'une fois par an. ^c Norme secondaire. ^d Particules de diamètre ≥ 10 µm.

Source: EPA, 1993.

Les normes et les directives existantes

Des organisations internationales comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), des pays tels que les Etats-Unis ou le Canada, notamment, et des organismes privés tels que l'ASHRAE ont établi des directives et des normes d'exposition. Pour sa part, l'Union européenne (UE) a présenté, par l'intermédiaire du Parlement européen, une résolution sur la qualité de l'air dans les espaces intérieurs, qui reconnaît la nécessité pour la Commission européenne de proposer aussitôt que possible des directives spécifiques incluant:

1. une liste des substances à interdire ou à réglementer, tant pour la construction que pour l'entretien des bâtiments;
2. des normes de qualité applicables aux différents types d'environnements intérieurs;
3. des prescriptions pour la conception, la construction, la gestion et la maintenance des installations de climatisation et de ventilation;
4. des normes minimales pour l'entretien des bâtiments ouverts au public.

De nombreux composés chimiques ont des odeurs et des propriétés irritantes à des concentrations qui, dans l'état actuel des connaissances, ne présentent pas de danger pour les occupants d'un bâtiment, mais qui peuvent être ressenties comme inconfortables par de nombreuses personnes. Les valeurs de référence adoptées tiennent généralement compte de cette éventualité.

Etant donné qu'il n'est pas recommandé d'appliquer les normes de l'hygiène du travail au contrôle de l'air intérieur sans certains facteurs de correction, il est souvent préférable de s'en tenir aux valeurs de référence contenues dans les directives et les normes qui visent la qualité de l'air ambiant. L'Agence pour la protection de l'environnement (Environmental Protection Agency (EPA)), aux Etats-Unis, a établi, pour l'air ambiant, des normes qui devraient assurer une marge de sécurité suffisante pour la population en général (normes primaires) et même pour son bien-être (normes secondaires). Ces valeurs de référence constituent un guide général utile en matière de qualité acceptable pour

Tableau 44.18 • Valeurs de référence de l'OMS pour certaines substances contenues dans l'air^a

Polluant	Valeur préconisée (moyenne dans le temps)	Durée de l'exposition
Composés organiques		
Chlorure de méthylène	3 mg/m ³	24 heures
1,2-Dichloroéthane	0,7 mg/m ³	24 heures
Formaldéhyde	100 µg/m ³	30 minutes
Monoxyde de carbone	100 mg/m ³ ^b	15 minutes
	60 mg/m ³ ^b	30 minutes
	30 mg/m ³ ^b	1 heure
	10 mg/m ³	8 heures
Styrène	800 µg/m ³	24 heures
Sulfure de carbone	100 µg/m ³	24 heures
Tétrachloroéthylène	5 mg/m ³	24 heures
Trichloroéthylène	1 mg/m ³	24 heures
Toluène	8 mg/m ³	24 heures
Produits inorganiques		
Cadmium	1-5 ng/m ³	1 an (zones rurales)
	10-20 ng/m ³	1 an (zones rurales)
Dioxyde d'azote	400 µg/m ³	1 heure
	150 µg/m ³	24 heures
Manganèse	1 µg/m ³	1 heure
Mercurure	1 µg/m ³ ^c	1 heure
Ozone	150-200 µg/m ³	1 heure
	10-120 µg/m ³	8 heures
Plomb	0,5-1,0 µg/m ³	1 an
Sulfure d'hydrogène	150 µg/m ³	10 minutes
	350 µg/m ³	1 heure
Vanadium	1 µg/m ³	24 heures

^a Les informations figurant dans ce tableau sont basées sur les effets sur la santé constatés chez l'humain autres que le cancer ou une gêne olfactive. Elles doivent être utilisées en liaison avec les indications données dans la publication originale. ^b L'exposition à ce niveau de concentration ne devrait pas dépasser le temps indiqué ni être répétée avant 8 heures au moins. ^c Cette valeur concerne uniquement l'air intérieur.

Source: OMS, 1987.

l'air d'un espace intérieur donné; certaines normes, telles que ASHRAE-62-1989, les utilisent comme critères de qualité pour le renouvellement de l'air dans un bâtiment clos. Le tableau 44.17 indique ces valeurs de référence pour le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote, l'ozone, le plomb et les matières particulaires.

L'OMS, de son côté, a émis certaines directives de base pour assurer la protection de la santé publique contre les effets nocifs de la pollution atmosphérique et pour éliminer ou réduire le plus possible les émissions de polluants que l'on sait ou que l'on suspecte être dangereux pour la santé de l'être humain ou nuisibles à son bien-être (OMS, 1987). Ces directives ne font pas de distinction entre les différents types d'exposition considérés et elles couvrent donc les expositions extérieures, aussi bien que celles des locaux intérieurs. Les tableaux 44.18 et 44.19 mentionnent les valeurs que propose l'OMS (1987) pour les substances non cancé-

Tableau 44.19 • Valeurs de référence de l'OMS pour certaines substances non cancérigènes contenues dans l'air^a

Polluant	Odeur, seuil		Valeur préconisée
	Détection	Reconnaissance	
Tétrachloroéthylène	8 mg/m ³	24-32 mg/m ³	8 mg/m ³
Toluène	1 mg/m ³	10 mg/m ³	1 mg/m ³
Sulfure de carbone	200 µg/m ³	— ^b	20 µg/m ³ ^c
Sulfure d'hydrogène	0,2-2,0 µg/m ³	0,6-6,0 µg/m ³	7 µg/m ³
Styrène	70 µg/m ³	210-280 µg/m ³	70 µg/m ³

^a Ces informations sont basées sur les effets sensoriels ou sur une sensation d'inconfort ressentis pendant 30 minutes en moyenne. ^b Données non fournies. ^c La fabrication de la viscose donne lieu à l'émission d'autres substances odorantes telles que le sulfure d'hydrogène et le sulfure de carbonyle.

Source: OMS, 1987.

Tableau 44.20 • Valeurs de référence préconisées pour le radon par trois organisations

Organisation	Concentration	Recommandation
Environmental Protection Agency (EPA)	4-20 pCi/litre	Réduire le niveau en quelques années
	20-200 pCi/litre	Réduire le niveau en quelques mois
Union européenne (UE)	200 pCi/litre	Réduire le niveau en quelques semaines ou évacuer les occupants
	> 400 Bq/m ³ ^{a,b} (bâtiments existants)	Réduire le niveau
Organisation mondiale de la santé (OMS)	> 400 Bq/m ³ ^a (nouvelles constructions)	Réduire le niveau
	> 100 Bq/m ³ EER ^c	Réduire le niveau
	> 400 Bq/m ³ EER ^c	Prendre des mesures immédiates

^a Concentration annuelle moyenne de radon. ^b Equivalent à une dose de 20 mSv/an. ^c Moyenne annuelle.

rogènes, en distinguant entre celles qui sont nocives et celles qui ne causent qu'une sensation d'inconfort.

Pour les substances cancérigènes, l'EPA a créé la notion d'*unités de risque*. Ces unités représentent un facteur utilisé pour calculer la probabilité accrue qu'à un être humain de contracter un cancer du fait de son exposition pendant sa vie entière à une substance cancérigène se trouvant dans l'air à une concentration de 1 µg/m³. Cette notion est applicable aux substances qui peuvent être présentes dans l'air intérieur, c'est-à-dire des métaux comme l'arsenic, le chrome hexavalent et le nickel, à des composés organiques comme le benzène, l'acrylonitrile et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, ou encore à des matières particulaires, comme l'amiante.

En ce qui concerne le radon, on trouvera au tableau 44.20 les valeurs de référence et les recommandations émanant de différents organismes. C'est ainsi que l'EPA propose une série d'interventions graduelles lorsque les niveaux de radon dans l'air

intérieur dépassent 4 pCi/litre (150 Bq/m³) et donne une indication quant aux délais dans lesquels il convient de réduire ces niveaux. L'Union européenne, sur la base d'un rapport présenté en 1987 par un groupe de travail de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), recommande de son côté une concentration limite annuelle moyenne pour le radon, en distinguant entre les bâtiments existants et les constructions neuves. L'OMS, quant à elle, a fondé ses recommandations en tenant compte d'une exposition aux produits de désintégration du radon exprimée sous la forme d'une concentration d'équivalent équilibré de radon (EER) et de l'augmentation du risque de contracter un cancer comprise entre $0,7 \times 10^{-4}$ et $2,1 \times 10^{-4}$ pour une exposition égale à 1 Bq/m³ EER pendant la vie entière.

Il convient, en terminant, de rappeler que les valeurs de référence sont établies, en général, sur la base des effets connus de chaque substance sur la santé. Bien que cela exige souvent une

tâche ardue lorsqu'il s'agit de l'air l'intérieur, ces valeurs ne tiennent pas compte des effets de synergie possibles entre certaines substances. C'est le cas, par exemple, des composés organiques volatils (COV). Certains auteurs ont évoqué la possibilité de définir des niveaux totaux de concentrations des composés organiques volatils (COVT) auxquels les occupants d'un bâtiment pourraient commencer à réagir. Cette proposition se heurte cependant à une grande difficulté, à savoir que, du point de vue de l'analyse, on n'est pas encore parvenu à s'entendre sur une définition des COVT qui satisfasse tout le monde.

En fait, l'établissement de valeurs de référence dans le domaine relativement nouveau de la qualité de l'air intérieur dépendra à l'avenir des politiques de l'environnement qui seront mises en œuvre, ces politiques étant elles-mêmes fonction des progrès réalisés tant dans la connaissance des effets des polluants que dans l'amélioration des techniques d'analyse.

Références bibliographiques

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1989: *Guidelines for the Assessment of Bioaerosols in the Indoor Environment* (Cincinnati).
- American Society for Testing Materials (ASTM), 1989: *Standard Guide for Small-scale Environmental Determinations of Organic Emissions from Indoor Materials Products* (Atlanta).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1989: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* (Atlanta).
- Brownson, R.C., Alavanja, M.C. et Hock, E.T., 1993: «Reliability of passive smoke exposure histories in a case-control study of lung cancer», *International Journal of Epidemiology*, vol. 22, n° 5, pp. 804-808.
- Brownson, R.C., Alavanja, M.C., Hock, E.T. et Loy, T.S., 1992: «Passive smoking and lung cancer in nonsmoking women», *American Journal of Public Health*, vol. 82, n° 11, pp. 1525-1530.
- Brunnemann, K.D. et Hoffmann, D., 1974: «The pH of tobacco smoke», *Food and Cosmetics Toxicology*, vol. 12, n° 1, pp. 115-124.
- 1991: «Analytical studies on tobacco-specific N-nitrosamines in tobacco and tobacco smoke», *Critical Reviews in Toxicology*, vol. 21, n° 4, pp. 235-240.
- Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), 1986: «Tobacco smoking», *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans and Supplements to the Monographs*, vol. 38 (Lyon).
- 1987a: «Bis(chloromethyl) ether and chloromethyl methyl ether», dans *Some Aromatic Amines, Hydrazine and Related Substances, N-Nitroso Compounds and Miscellaneous Alkylating Agents* (vol. 4, 1974), dans *ibid.*; et supplément n° 7: *Overall Evaluation of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs, Volumes 1 to 42* (Lyon).
- 1987b: «Coke production», dans *Polynuclear Aromatic Compounds. Part 3: Industrial Exposures in Aluminium Production, Coal Gasification, Coke Production, and Iron and Steel Founding*, dans *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans and Supplements to the Monographs*, op. cit. (vol. 34, 1984); et supplément n° 7, *ibid.* (Lyon).
- 1987c: «Environmental Carcinogens. Methods of Analysis and Exposure measurement: Volume. 9: Passive smoking», *IARC Scientific Publications No 81* (Lyon).
- 1987d: «Nickel and nickel compounds», dans *Cadmium, Nickel, Some Epoxides, Miscellaneous Industrial Chemicals and General Considerations on Volatile Anaesthetics*, dans *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans and Supplements to the Monographs*, op. cit. (vol. 11, 1976); et supplément n° 7: *Overall Evaluation of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs, Volumes 1 to 42, op.cit.* (Lyon).
- 1987e: *Overall Evaluation of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs, Volumes 1 to 42*, dans *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans and Supplements to the Monographs*, supplément n° 7 (Lyon).
- COST Project 613, 1989: «Formaldehyde emissions from wood based materials: Guideline for the establishment of steady state concentrations in test chambers», rapport n° 2, dans *ECA Indoor Air Quality and its Impact on Man* (Luxembourg, Office for Official Publications of the European Community).
- 1991: «Guideline for the characterization of volatile organic compounds emitted from indoor materials and products using small test chambers», rapport n° 8, *ibid.*
- Environmental Protection Agency (EPA), 1992: *Respiratory Health Effects of Passive Smoking: Lung Cancer and Other Disorders* (Washington, DC).
- 1993: National primary and secondary ambient air quality standards», *Code of Federal Regulations*, Title 40, Chapter I, Subchapter C, Part 50 (Washington, DC, Office of the Federal Register).
- Eudy, L.W., Thorne, F.A., Heavner, D.K., Green, C.R. et Ingebretsen, B.J., 1986: «Studies on the vapour-particulate phase distribution of environmental nicotine by selective trapping and detection methods», dans *Proceedings of the 79th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Pittsburgh, Pennsylvania, June*, pp. 2-14.
- Fecley, J.C., 1988: «Legionellosis: Risk associated with building design», dans R.B. Kundsinn (directeur de publication): *Architectural Design and Indoor Microbial Pollution* (Oxford, Oxford University Press).
- Flannigan, B., 1992: «Indoor microbiological pollutants — sources, species, characterisation: An evaluation», dans H. Knöppel et P. Wolkoff (directeurs de publication): *Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality — State of the Art in SBS* (Dordrecht, Kluwer).
- 1993: «Approaches to the assessment of microbial flora of buildings», *Environments for People: IAQ '92* (Atlanta, ASHRAE).
- Freixa, A., 1993: *Calidad del Aire: Gases Presentes a Bajas Concentraciones en Ambientes Cerrados* (Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Gomel, M., Oldenburg, B., Simpson, J.M. et Owen, N., 1993: «Work-site cardiovascular risk reduction: A randomized trial of health risk assessment, education, counselling, and incentives», *American Journal of Public Health*, vol. 83, n° 9, pp. 1231-1238.
- Guerin, M.R., Jenkins, R.A. et Tomkins, B.A., 1992: *The Chemistry of Environmental Tobacco Smoke: Composition and Measurement* (Chelsea, Michigan, Lewis).
- Hammond, S.K., Coghlin, J., Gann, P.H., Paul, M., Taghizadeh, K., Skipper, P.L. et Tannenbaum, S.R., 1993: «Relationship between environmental tobacco smoke exposure and carcinogen-hemoglobin adduct levels in nonsmokers», *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 85, n° 6, pp. 474-478.
- Hecht, S.S., Carmella, S.G., Murphy, S.E., Akerkar, S., Brunnemann, K.D. et Hoffmann, D., 1993: «A tobacco-specific lung carcinogen in the urine of men exposed to cigarette smoke», *New England Journal of Medicine*, vol. 329, n° 21, pp. 1543-1546.
- Heller, W.D., Sennewald, E., Gostomzyk, J.G., Scherer, G. et Adlkofer, F., 1993: «Validation of ETS-exposure in a representative population in Southern Germany», *Indoor Air Publ. Conf.*, vol. 3, pp. 361-366.
- Hilt, B., Langard, S., Andersen, A. et Rosenberg, J., 1985: «Asbestos exposure, smoking habits, and cancer incidence among production and maintenance workers in an electrochemical plant», *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 8, n° 6, pp. 565-577.
- Hoffmann, D. et Hecht, S.S., 1990: «Advances in tobacco carcinogenesis», dans C.S. Cooper et P.L. Grover (directeurs de publication): *Handbook of Experimental Pharmacology* (New York, Springer).
- Hoffmann, D. et Wynder, E.L., 1976: «Smoking and occupational cancers», *Preventive Medicine*, vol. 5, n° 2, pp. 245-261.
- Johanning, E., Morey, P.R. et Jarvis, B.B., 1993: «Clinical-epidemiological investigation of health effects caused by *Stachybotrys atra* building contamination», dans *Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (Helsinki).
- Kabat, G.C. et Wynder, E.L., 1984: «Lung cancer in nonsmokers», *Cancer*, vol. 53, n° 5, pp. 1214-1221.
- Luceri, F., Peiraccini, G., Moneti, G. et Dolara, P., 1993: «Primary aromatic amines from side-stream cigarette smoke are common contaminants of indoor air», *Toxicology and Industrial Health*, vol. 9, n° 3, pp. 405-413.
- Mainville, C., Auger, P.L., Smorgawiewicz, W., Neculcea, D., Neculcea, J. et Levesque, M., 1988: «Mycotoxins et syndrome d'extrême fatigue dans un hôpital», dans B. Pettersson et T. Lindvall (directeurs de publication): *Healthy Buildings '88: State of the Art Review*, vol. 2 (Stockholm, Swedish Council for Building Research).
- Masi, M.A., Hanley, J.A., Ernst, P. et Becklake, M.R., 1988: «Environmental exposure to tobacco smoke and lung function in young adults», *American Review of Respiratory Disease*, vol. 138, n° 2, pp. 296-299.
- McLaughlin, J.K., Dietz, M.S., Mehl, E.S. et Blot, W.J., 1987: «Reliability of surrogate information on cigarette smoking by type of informant», *American Journal of Epidemiology*, vol. 126, n° 1, pp. 144-146.
- McLaughlin, J.K., Mandel, J.S., Mehl, E.S. et Blot, W.J., 1990: «Comparison of next of kin with self-re-

- spondents regarding question on cigarette, coffee and alcohol consumption», *Epidemiology*, vol. 1, n° 5, pp. 408-412.
- Medina, E., Medina, R. et Kaempffer, A.M., 1988: «Effects of domestic smoking on the frequency of infantile respiratory diseases», *Revista Chilena de Pediatría*, vol. 59, pp. 60-64.
- Miller, J.D., 1993: «Fungi and the building engineer», *Environments for People: IAQ '92* (Atlanta, ASHRAE).
- Morey, P.R., 1993a: «Microbiological events after a fire in a high-rise building», dans *Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (Helsinki).
- , 1993b: «Use of hazard communication standard and general duty clause during remediation of fungal contamination», *ibid.*
- Nathanson, T., 1993: *Indoor Air Quality in Office Buildings: A Technical Guide* (Ottawa, Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health).
- New York City Department of Health, 1993: *Guidelines on Assessment and Remediation of Stachybotrys atra in Indoor Environments* (New York).
- Organisation mondiale de la santé (OMS), 1987: *Air Quality Guidelines for Europe*, European Series No. 23 (Copenhague, Bureau de l'Europe).
- Pershagen, G., Wall, S., Taube, A. et Linnman, I., 1981: «On the interaction between occupational arsenic exposure and smoking and its relationship to lung cancers», *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 7, n° 4, pp. 302-309.
- Riedel, F., Bretthauer, C. et Rieger, C.H.L., 1989: «Effect of passive smoking on bronchial reactivity in school children» (en allemand), *Pneumologie*, vol. 43, n° 3, pp. 164-168.
- Saccomanno, G., Huth, G.C., Auerbach, O. et Kuschner, M., 1988: «Relationship of radioactive radon daughters and cigarette smoking in genesis of lung cancer in uranium miners», *Cancer*, vol. 62, n° 7, pp. 1402-1408.
- Sorenson, W.G., 1989: «Health impact of mycotoxins in the home and workplace: An overview», dans C.E. O'Rear et G.C. Llewellyn (directeurs de publication): *Biodeterioration Research 2* (New York, Plenum).
- Swedish Work Environment Fund, 1988: *To Measure or to Take Direct Remedial Action? Investigation and Measurement Strategies in the Working Environment* (Stockholm).
- US National Research Council, 1986: *Environmental Tobacco Smoke: Measuring Exposures and Assessing Health Effect* (Washington, DC, National Academy of Sciences).
- US Surgeon General, 1985: *The Health Consequences of Smoking: Cancer and Chronic Lung Disease in the Workplace* (Washington, DC, DHHS (PHS)).
- , 1986: *The Health Consequences of Involuntary Smoking* (Washington, DC, DHHS (CDC)).
- Wald, N.J., Boreham, J., Bailey, A., Ritchie, C., Had-dow, J.E. et Knight, J., 1984: «Urinary cotinine as marker of breathing other people's tobacco smoke», *The Lancet*, vol. 1, n° 8370, pp. 230-231.
- Wanner, H., Verhoeff, A., Colombo, A., Flannigan, B., Gravesen, S., Mouilleseaux, A., Nevalainen, A., Papadakis, J. et Seidel, K., 1993: «Biological particles in indoor environments», dans *ECA Indoor Air Quality and its Impact on Man*, *op. cit.*
- White, J.R. et Froeb, H.F., 1980: «Small-airways dysfunction in nonsmokers chronically exposed to tobacco smoke», *New England Journal of Medicine*, vol. 302, n° 13, pp. 720-723.

Références complémentaires

- Berenguer, M.J., 1991: *Síndrome del Edificio Enfermo: Factores de Riesgo* (Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Berenguer, M.J., Guardino, X., Hernández, A., Martí, M.C., Nogareda, C. et Solé, M.D., 1994: *El Síndrome del Edificio Enfermo. Guía para su Evaluación* (Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), 1993: «Environmental Carcinogens: Methods of Analysis and Exposure Measurement — vol. 12: Indoor Air Contaminants», *IARC Scientific Publications No. 109* (Lyon).
- Department of the Environment, 1993: *Urban Air Quality in the United Kingdom* (Londres).
- Dudney, C.S. et Copenhaver, E.D., 1983: «The elements of indoor air quality», dans P.J. Walsh, C.S. Dudney et E.D. Copenhaver (directeurs de publication): *Indoor Air Quality* (Boca Raton, Floride, CRC Press).
- Fanger, P.O., 1990: «Indoor air quality perceived by human beings», dans D.M. Weekes et R.B. Gammage (directeurs de publication): *The Practitioner's Approach to Indoor Air Quality Investigations: Proceedings, Indoor Air Quality International Symposium* (Akron, Ohio, American Industrial Hygiene Association).
- Godish, T., 1989: *Indoor Air Pollution Control* (Chelsea, Michigan, Lewis).
- , 1991: *Air Quality* (Chelsea, Michigan, Lewis).
- Guardino, X., 1984: *Toma de Muestra de Gases y Vapores con Bolsa. Norma General* (Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Knöppel, H. et Wolkoff, P., 1992: *Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality — State of the Art in SBS* (Dordrecht, Kluwer).
- Lewis, R.G. et Wallace, L., 1989: «Workshop: Instrumentation and methods for measurement of indoor air quality and related factors», dans N.L. Nageda et

- J.P. Harper (directeurs de publication): *Design and Protocol for Monitoring Indoor Air Quality* (Philadelphie, ASTM).
- Morey, P.R. et Feeley, J.C., 1990: «The landlord, tenant, and investigator: Their needs, concerns, and viewpoints», dans J.C. Feeley et J.A. Otten (directeurs de publication): *Biological Contaminants in Indoor Environments* (Philadelphie, ASTM).
- Nageda, N.L., Rector, H.E. et Koontz, M.D., 1987: *Guidelines for Monitoring Indoor Air Quality* (Washington, DC, Hemisphere).
- Namiesnik, J., Gorecki, T., Kosdron-Zabiegala, B. et Lukasiak, J., 1992: «Indoor air quality, pollutants, their sources and concentration levels», *Building Environment*, vol. 27, n° 3, pp. 339-356.
- Nguyen, V.H., Beaudry, C., Domini, G. et Renzi, P., 1999: «La qualité de l'air intérieur, aspects techniques, médicaux et juridiques», 2^e édition (Cowansville, Editions Yvon Blais).
- Organisation mondiale de la santé (OMS), 1989: *Indoor Air Quality: Organic Pollutants* (Copenhague, Bureau de l'Europe).
- Otson, R. et Fellin, P., 1992: «Volatile organics in the indoor environment: Sources and occurrence», dans J. Nriagu (directeur de publication): *Gaseous Pollutants: Characterisation and Cycling* (New York, Wiley).
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), 1985: *Radiation Doses, Effects, Risks* (Nairobi).
- Rafferty, P.J. et Quinlan, P.J., 1990: «The practitioner's guide to indoor air quality», dans D.M. Weekes et R.B. Gammage (directeurs de publication): *The Practitioner's Approach to Indoor Air Quality Investigations: Proceedings, Indoor Air Quality International Symposium*, *op. cit.*
- Scheff, P.A., Wadden, R.A. et Bates, B.A., 1990: «Indoor air pollution», dans L.V. Cralley, L.J. Cralley et W.C. Cooper (directeurs de publication): *Health and Safety Beyond the Workplace* (New York, Wiley).
- Seifert, J., 1992: «Regulating Indoor Air», dans H. Knöppel et P. Wolkoff (directeurs de publication): *Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality — State of the Art in SBS* (Dordrecht, Kluwer).
- Turiel, I., 1986: *Indoor Air Quality and Human Health* (Palo Alto, Californie, Stanford University Press).
- Wadden, R.A. et Scheff, P.A., 1983: *Indoor Air Pollution. Characterization, Prediction and Control* (New York, Wiley).
- Yocom, J.E. et McCarthy, S.M., 1991: *Measuring Indoor Air Quality: A Practical Guide* (Chichester, Wiley).