

La qualité de l'air intérieur : une préoccupation croissante

*Vance BERGERON, Amine METAHNI
Ecole Normale Supérieure de Lyon,
Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672 - 46 allée d'Italie
69007 Lyon, France*

Résumé

La Qualité de l'Air Intérieur (QAI) est en passe de devenir une problématique de santé publique majeure : L'usage croissant de matières plastiques dans les meubles ainsi que dans les appareils électroménagers, les solvants chimiques ainsi que les matériaux de construction traités, associés aux mesures d'isolation et d'étanchéification des bâtiments, ont causé une augmentation sans précédent des polluants aéroportés intérieurs. Cela explique que l'augmentation des cas d'asthme et d'allergies, les maladies pulmonaires, certains cancers ainsi que le fameux "syndrome du bâtiment malsain" aient tous été mis sur le compte du temps croissant passé dans des atmosphères confinées. La prise en compte de cette problématique impose d'abord que l'on identifie et quantifie les diverses particules en suspension, de même que les polluants chimiques que l'on trouve dans les espaces fermés, puis que l'on évalue les niveaux de risques en fonction de l'exposition humaine qui en résulte. Les organismes de réglementation ainsi que la communauté scientifique fournissent aujourd'hui un effort important afin de quantifier et établir les niveaux de risques ainsi que les marches à suivre pour résoudre ces problèmes, et ce pour chaque classe de polluant. Nous allons tout au long de cet article en faire le tour et fournir un aperçu des directives d'ores et déjà établies ainsi que de celles à venir.

Mots clés : Qualité de l'Air Intérieur, Polluants Aéroportés, Composés Organiques Volatils, Syndrome du Bâtiment Malsain, AFSSET, OQAI.

Summary

Indoor air quality (IAQ) concerns the levels and human exposure to the various particulate, chemical and biological pollutants found in enclosed habitable spaces and has become a growing public health concern. The prolific use of plastics in furniture and appliances, chemical solvents and treated building materials, coupled with engineering measures to seal and insulate buildings have caused a dramatic rise in indoor airborne pollutants. Indeed, the rising cases of asthma and allergies, pulmonary diseases, certain cancers and so-called "sick-building syndrome" have all been attributed to the increased time spent indoors. To address these concerns a significant effort is underway by regulatory bodies and the scientific community to quantify and establish risk levels and guidelines for each class of airborne pollutant. In this article we provide an overview of this ongoing endeavour and provide insight into the current established guidelines and future development.

Keywords: Indoor Air Quality, Airborne Pollutants, Volatile Organic Compounds, Sick Building Syndrome, AFSSET, OQAI.

1. Introduction

La qualité de l'air intérieur (QAI) désigne la qualité de l'air au sein et aux environs des bâtiments, ce terme étant employé plus particulièrement lorsqu'il est mis en relation avec la santé et le confort des occupants du bâtiment. C'est une préoccupation de santé publique majeure dans la mesure où nous passons 80 à 90% de notre temps à l'intérieur d'un bâtiment. Notre exposition à des polluants nocifs peut donc être potentiellement critique. Qui plus est, de récentes études ont estimé que l'air intérieur est jusqu'à six fois plus pollué que l'air extérieur. Différentes sources peuvent être à l'origine d'un problème de pollution de l'air intérieur. Ce problème se manifeste généralement lorsque l'air frais circulant à travers l'environnement est limité, lorsque des substances toxiques présentes libèrent des composés organiques volatils (COV), ou lorsque l'air extérieur diffusé à l'intérieur est lui-même pollué, et enfin lorsqu'une humidité excessive favorise la croissance de moisissures.

Parmi les symptômes typiques ressentis et causés ou aggravés par la pollution de l'air intérieur, on peut citer les maux de tête, les irritations des sinus, la torpeur, les congestions des voies respiratoires supérieures, et les irritations oculaires. Nous pouvons y ajouter des pathologies comme l'asthme, les affections respiratoires chroniques, ainsi que les habituels rhumes et gripes : toutes peuvent être directement liées à une mauvaise

qualité de l'air intérieur. Des problèmes de santé à long terme peuvent aussi apparaître à cause d'une exposition à divers COV cancérigènes, et dans d'autres cas, une pollution de l'air intérieur peut causer des infections potentiellement mortelles, comme la légionellose.

Plusieurs variables entrent en jeu dans la pollution de l'air intérieur. Nous pouvons citer par exemple l'utilisation de produits chimiques comme le formaldéhyde dans les moquettes et les meubles ; le monoxyde de carbone issu de la fumée de cigarette et du trafic automobile, les polychlorobiphényles (PCB) contenus dans les transformateurs électrique, l'amiante utilisée pour l'isolation des bâtiments, l'ozone issu des photocopieurs, les solvants utilisés dans les produits d'entretien, les colles et les parfums, etc... L'amiante peut causer des problèmes de santé lorsqu'elle est inhalée et pénètre dans les poumons : l'inhalation de fibres d'amiante aéroportées en particules très fines a été associée à des maladies comme l'amiantose, le mésothéliome et le cancer du poumon. Il existe également des causes naturelles à cette pollution. Par exemple, l'être humain expire du dioxyde de carbone, qui en petites quantités n'est pas toxique, mais qui peut devenir dangereux s'il lui est permis de s'accumuler en grandes concentrations. Des microorganismes et bactéries peuvent aussi se développer au sein du système de ventilation. Si c'est le cas, ces derniers peuvent alors se disperser au travers de l'ensemble de l'espace de travail et du bâtiment par son intermédiaire.

Les problèmes de qualité de l'air sont en partie créés et aggravés par l'étanchéification des bâtiments, dans lesquels de nombreuses personnes vivent et travaillent. La conception de ces édifices, destinée à réduire la consommation énergétique, a été identifiée comme une des principales causes du syndrome du bâtiment malsain.

Nous nous proposons dans cet article de présenter une vue générale de la situation des connaissances actuelles sur les effets des principaux polluants que l'on trouve aujourd'hui dans les espaces confinés dans lesquels nous travaillons et vivons. Nous précisons aussi les mesures qui sont prises ou recommandées pour nous en protéger. Nous ne traiterons pas de la pollution par les rayonnements, électromagnétiques ou ionisants (problème de la contamination par le radon), qui nous a paru relever d'une approche plus spécifique.

2. Comment caractériser l'air intérieur - Quels niveaux d'alerte ?

Depuis quelques années, une attention croissante est portée à ce sujet, avec en particulier la création par les pouvoirs publics, en 2001, de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) dont la vocation est de dresser un état des lieux des expositions aux polluants de l'air dans les lieux de vie intérieurs et d'en identifier les déterminants, afin d'apporter les informations pour l'évaluation et la gestion des risques sanitaires associés. Les données collectées ont confirmé la nécessité de disposer, au niveau national, de valeurs de référence permettant de situer les niveaux de concentrations mesurés dans les environnements clos et d'instaurer des mesures de réduction des émissions proportionnées notamment au risque potentiel encouru. Par ailleurs, le manque de niveaux de référence pour la qualité de l'air intérieur limite le développement de référentiels utiles pour la qualification, en termes sanitaires, des émissions de composés par les produits de construction, de décoration ou d'usage courant. Ces éléments manquent également pour la conception de protocoles en vue de la spécification de bâtiments à Haute Qualité Environnementale.

A l'échelle internationale, des valeurs de recommandations sont proposées dans certains pays et par quelques organismes reconnus, parmi lesquelles les valeurs guides pour la qualité de l'air ^[1] et plus récemment celles issues du projet européen INDEX ^[2]. Coordonné par le Dr. Dimitrios Kotzias (*Commission of The European Union, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit in Ispra, Italy*) et financé par la DG Sanco (*Direction générale de la Commission européenne pour la santé et la protection des consommateurs*), le projet INDEX avait pour but d'élaborer une liste de polluants chimiques prioritaires des environnements intérieurs susceptibles d'être réglementés dans le futur et de proposer des valeurs guides de qualité d'air intérieur.

La caractérisation de la QAI implique la collecte d'échantillons d'air, le suivi de l'exposition humaine aux polluants, le recueil d'échantillons sur les surfaces du bâtiment, ainsi que la modélisation des flux d'air à l'intérieur de l'édifice. En utilisant cette approche, les organismes de réglementation sont capables d'établir des limites et des directives pour certains niveaux de contamination de l'air.

En France, les principaux organismes régissant ces activités sont l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET) et l'Association Française de Normalisation (AFNOR), qui travaille en étroite collaboration avec l'International Organization for Standardization (ISO) dont elle est membre. Ces organismes ont commencé à établir certaines "valeurs guides de qualité d'air intérieur" (VGAI) ^[3-5]. Les valeurs guides de qualité d'air intérieur, telles que définies par l'AFSSET, sont des concentrations dans l'air d'une substance chimique en dessous desquelles aucun effet sanitaire ou (dans le cas de composés odorants) aucune nuisance ou encore aucun effet indirect important sur la santé n'est en principe attendu

pour la population générale. Elles visent ainsi à préserver la population de tout effet néfaste lié à l'exposition à cette substance. Cette définition est généralement applicable dans le cadre de valeurs guides construites pour protéger d'effets à seuil de dose. Dans le cas d'effets sans seuil de dose identifié, tels que les effets cancérogènes dont le mode d'action est génotoxique, il existe aussi des valeurs guides mais celles-ci sont exprimées sous la forme de niveaux de risque correspondant à une probabilité de survenue de la maladie.

Pour la QAI, les recommandations et les directives se divisent en trois catégories de polluants :

- les particules en suspension,
- les polluants chimiques (monoxyde de carbone et COV)
- et la matière avec activité biologique.

Dans ce qui suit, nous allons les décrire et mettre en lumière les principaux outils utilisés pour quantifier chacun d'entre eux.

Les particules en suspension

Il s'agit de petites particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux, le terme aérosol désignant l'ensemble des particules et du gaz. Les sources de particules en suspension peuvent être d'origine humaine ou naturelle. Les volcans, les tempêtes de sable, les feux de forêts et la végétation qui produit du pollen sont des exemples de sources naturelles. Les activités humaines, comme l'utilisation de combustibles fossiles, les centrales électriques et divers procédés industriels, génèrent également des quantités significatives d'aérosols. Les particules formées dans l'atmosphère par condensation ou transformation de gaz émis comme le dioxyde de soufre SO_2 ou les COV sont aussi considérées comme des particules en suspension.

Les classifications les plus fréquentes appliquées aux particules se réfèrent à la taille ; on parle de fraction granulométrique. Comme les particules sont le plus souvent non-sphériques (les fibres d'amiante par exemple), il existe de nombreuses définitions de la taille d'une particule. La plus largement utilisée est le diamètre aérodynamique. Une particule d'un diamètre aérodynamique de 10 micromètres se déplace dans un gaz de la même façon qu'une sphère de densité unitaire (1 gramme par centimètre cube) et de 10 micromètres de diamètre. Les diamètres des particules en suspension ayant un rôle notable dans la QAI varient entre moins de 10 nanomètres et plus de 10 micromètres. Ce spectre va des particules les plus petites (quelques molécules) jusqu'aux plus grosses, la limite étant la taille au-delà de laquelle elles ne peuvent plus être aéroportées. La notation PM_{10} est utilisée pour décrire les particules de 10 micromètres ou moins ; $\text{PM}_{2,5}$ pour les particules de moins de 2,5 micromètres de diamètre aérodynamique. La Figure 1 montre la correspondance entre la taille des particules en suspension dans l'air et leur pénétration dans les voies respiratoires. Les fines particules (moins de 0,5 micromètres) peuvent pénétrer très profondément, jusqu'aux alvéoles pulmonaires, et des niveaux plus élevés de ces particules dans l'air sont liés à des risques de sanitaires comme les maladies cardiaques, l'altération de la fonction pulmonaire où le cancer du poumon.

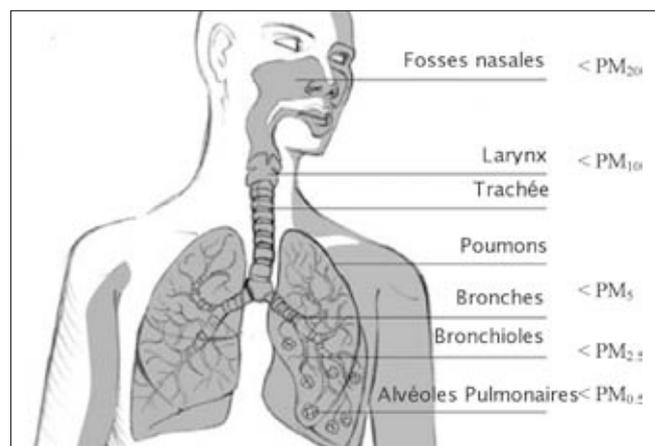


Figure 1. Schéma représentant la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire humain en fonction de leur taille.

Les niveaux de particules en suspension dans l'air sont mesurés grâce à des dispositifs utilisant la diffusion d'un rayon laser, et fournissant la concentration des particules pour différentes gammes de tailles de particules. Ces dispositifs existent en plusieurs formats, des unités portatives aux systèmes professionnels fixes. Les modèles les plus grands font passer plus d'air à travers le système et fournissent par conséquent des mesures plus précises, même si de petits dispositifs relativement peu chers et facilement transportables peuvent donner à l'utilisateur final une très bonne idée de la concentration particulaire ainsi que de la distribution de tailles de particules dans l'air environnant.

Le standard internationalement reconnu pour l'évaluation et la classification des niveaux de particules en suspension dans l'air intérieur est la **norme ISO 14644-1** ^[6], qui fournit, en plus des classes de particules en suspension, des directives et des procédures de mesure. Ces classes de propreté sont cataloguées de ISO 1 à ISO 9 et le Tableau 1 fournit les seuils actuels de niveau de particules utilisés pour définir les différentes classes. Pour information, les espaces de travail et lieux de vie habituels sont classés ISO 8 ou 9, tandis que les salles d'opérations des hôpitaux sont classées entre ISO 5 et ISO 6 lorsque leurs systèmes de traitement de l'air fonctionnent correctement. Bien que des objectifs spécifiques aient été définis pour les infrastructures de santé et les salles blanches, à l'heure actuelle il n'existe pas de recommandations générales pour les niveaux de particules aéroportées sur les lieux de travail. Cependant, des efforts de recherche et une nouvelle législation se mettent en route afin de les établir, avec une attention particulière sur les effets que les nanoparticules peuvent induire sur la santé. Bien entendu, les particules plus petites que PM₁₀ font partie des 12 polluants placés sur la liste de priorité de l'AFFSET pour développer des niveaux de VGAI. Malheureusement, il est très difficile d'évaluer les concentrations de particules nanométriques aéroportées, et de nouveaux instruments seront nécessaires pour quantifier et déterminer la limite inférieure de PM.

En France, l'amiante a été reconnue comme source de maladie professionnelle (asbestose) en 1945. Son usage a été réglementé à partir de 1977 après que toutes les formes d'amiante eurent été classées cancérogènes par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). L'interdiction totale de tout usage de l'amiante a été adoptée en 1997 en France et confirmée au niveau européen par la **directive 99/77/CE**, interdisant toute extraction, fabrication, transformation de fibres d'amiante au plus tard au 1er janvier 2005. Les fibres courtes d'amiante (FCA : longueur L < 5 micromètres, diamètre d < 3 micromètres et rapport L/d ≥ 3) ne sont donc mesurées ni en milieu professionnel ni en environnement général. Les fibres fines d'amiante (FFA : L ≥ 5 micromètres, d < 0,2 micromètres et L/d ≥ 3) font quant à elles l'objet de mesures en environnement général extérieur comme intérieur, mais sont exclues des études d'exposition aux postes de travail. Actuellement, l'AFFSET a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) une évaluation des risques liés aux milieux aériens pour les fibres courtes et fibres fines d'amiante.

Classification N°	Densité maximale autorisée (en particules par mètre cube d'air) de particules de taille supérieure ou égale à celles données ci-dessous					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	2	-	-	-	-
ISO 2	100	24	10	4	-	-
ISO 3	1.000	237	102	35	8	-
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	-
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7	-	-	-	352.000	83.200	2.930
ISO 8	-	-	-	3.520.000	832.000	29.300
ISO 9	-	-	-	35.200.000	8.320.000	293.000

Tableau 1. Standard ISO 14644-1 pour la propreté concernant les particules en suspension aéroportées. Les concentrations particulaires sont exprimées en nombre de particules par mètre cube. Si le seuil maximal est dépassé pour une seule des tailles de particules, alors c'est la classification suivante qui s'applique, jusqu'à ce que chaque limite soit satisfaite

Le monoxyde de carbone

L'un des polluants de l'air intérieur les plus toxiques est le monoxyde de carbone (CO). C'est un gaz sans couleur ni odeur produit par la combustion incomplète de combustibles fossiles. Les sources usuelles de CO sont la fumée de cigarette, les chauffages utilisant des combustibles fossiles, les chauffages centralisés défectueux, les fourneaux domestiques et les échappements automobiles. De hauts niveaux de CO privent le cerveau d'oxygène et peuvent causer nausées, pertes de conscience, voire la mort. Des diminutions de niveau de CO sont systématiquement observés dans le nombre croissant de restaurants non-fumeur et autres lieux publics devenus non-fumeurs.

Globalement, selon un rapport européen publié en 2005, pour la population mondiale, 80 % de l'exposition individuelle quotidienne au CO s'effectue dans des lieux clos, 6 % à l'extérieur et 14 % lors des transports motorisés. Les données de l'OQAI (2006) ^[7] montrent que sur un pas de temps de 30 min, la médiane des concentrations maximales observées est de 6,8 mg.m⁻³ (6 ppm) et que 2,6 %, des logements ont eu un maximum de concentration en CO dépassant 60 mg.m⁻³ (52 ppm) sur une période supérieure ou égale à 30 min. Sur un pas de temps de 8 heures, la médiane maximale des concentrations observées est de 3,8 mg.m⁻³ (3,3 ppm) et 6,4 % des logements ont dépassé la valeur de 10 mg.m⁻³ (9 ppm) sur ce pas de temps.

Se basant sur ces faits, l'AFSSET a proposé les valeurs VGAI suivantes :

- 10 mg.m⁻³ pour une exposition de 8 h
- 30 mg.m⁻³ pour une exposition de d'1 h
- 60 mg.m⁻³ pour une exposition de 30 min
- 100 mg.m⁻³ pour une exposition de 15 min

Les détails complets de cette études peuvent être trouvées dans "AFSSET - Valeurs guide de qualité d'air intérieur : Le monoxyde de carbone", Juillet 2007.

Détecteurs de monoxyde de carbone

La mise en place d'un détecteur de monoxyde de carbone permet d'être prévenu lorsque la concentration dans l'air de ce gaz devient dangereuse. Un détecteur de CO a pour but de déterminer la concentration de CO dans l'air et/ou de déclencher un signal d'alarme (voyant lumineux et signal sonore) lorsque la teneur en CO dépasse un certain seuil pendant une certaine durée. Il existe trois types de détecteurs disponibles sur le marché. Le premier est appelé détecteur électrochimique : ce genre de détecteur génère un courant électrique qui active une alarme dès que du monoxyde de carbone est décelé. Le deuxième type de détecteur de monoxyde de carbone est constitué d'un semi-conducteur en oxyde métallique. Le monoxyde de carbone réagit avec l'oxyde d'étain situé dans le détecteur, et cela provoque le déclenchement de l'alarme. Le troisième type de détecteur est constitué d'un disque enduit de gel : sous l'effet du monoxyde de carbone, le disque devient sombre et provoque ainsi la sonnerie d'alarme. Ces appareils coûtent entre 250 et 500€. Ils ont une durée de vie limitée et la plupart doivent être remplacés au bout de deux ou trois ans. Pour certains appareils, le fabricant prévoit un calibrage périodique, en moyenne deux fois par an.

Les détecteurs de CO à usage domestique doivent être conformes aux normes

- **NBN EN 50291** (relative aux méthodes d'essais et prescriptions de performances des appareils électriques pour la détection de monoxyde de carbone dans les locaux à usage domestique)
- et **NBN EN 50292** (guide de sélection, d'installation, d'utilisation et de maintenance des appareils électriques pour la détection de monoxyde de carbone dans les locaux à usage domestique).

La norme NBN EN 50291 stipule que le déclenchement de l'alarme doit se produire :

- après 120 minutes pour une concentration de 30 ppm
- entre 60 et 90 minutes pour une concentration de 50 ppm
- entre 10 et 40 minutes pour une concentration de 100 ppm
- avant 3 minutes pour une concentration de 300 ppm

Cette norme requiert par ailleurs que le détecteur de monoxyde de carbone :

- ait une durée d'autonomie et une garantie de 5 ans
- qu'une alarme signale la fin d'autonomie
- que le détecteur puisse fonctionner à des températures entre -10°C et +40°C
- que la puissance sonore soit au moins de 85 dB à 3 mètres
- que les alarmes sonore et visuelle soient intégrées.

Par ailleurs la norme NBN EN 50292 fournit des informations sur la sélection, l'installation, l'utilisation et la maintenance des appareils de détection de monoxyde de carbone prévus pour un fonctionnement continu dans les locaux à usage domestique.

Les composés organiques volatils (COV)

Les COV sont des gaz émis depuis certains solides ou liquides. Ils comprennent une grande variété de produits chimiques, dont certains peuvent avoir à court ou long terme, un effet négatif sur la santé. De nombreux COV ont une concentration plus élevée en intérieur (jusqu'à dix fois plus) qu'en l'extérieur. Ils sont émis par une large gamme de produits, de l'ordre de plusieurs milliers, incluant peintures, laques, décapants, dissolvants, produits de nettoyages, pesticides, matériaux de construction, mobilier, photocopieurs, imprimantes, correcteurs liquides, colles, adhésifs, marqueurs permanents, solutions photographiques... Les solvants organiques sont également largement utilisés en tant que composants de nombreux produits d'entretien, de désinfection, et dans les cosmétiques. Tous ces produits peuvent libérer des composés organiques durant leur utilisation et, dans une certaine mesure, lorsqu'ils sont stockés.

Les polluants secondaires générés lors de réactions d'oxydation entre l'ozone atmosphérique et des COV primaires de l'air, sont responsables d'une émission directe de COV. Dans ce cas de figure, des composés organiques de grande taille peuvent être oxydés en aldéhydes (comme l'acétaldéhyde ou le formaldéhyde) qui sont soupçonnés d'être cancérigènes. Il existe également des preuves de la création de particules nanométriques par l'intermédiaire de ces réactions.

Des particules totalement nouvelles peuvent être formées par un processus connu sous le nom de nucléation homogène. Des travaux relativement récents ont montré qu'en présence de faibles concentrations d'ammoniac, l'acide sulfurique formé par l'oxydation du dioxyde de soufre est capable en présence d'eau, de donner lieu à la formation de particules d'une taille d'environ 1 à 2 nanomètres au moment de leur naissance. Ces particules croissent relativement rapidement (à souvent plus de 10 nanomètre de diamètre par heure), et il est admis que cette croissance est principalement due à la condensation des produits d'oxydation des COV^[8,9]. Dans l'environnement terrestre, la formation de grandes concentrations de nanoparticules est fréquemment observée au-dessus des forêts boréales finlandaises. O'Dowl *et al.* ont montré que la composition de ces particules de 3 à 10 nanomètres est largement organique et semblable à l'acide pinique ou cis-pinonique, dérivé de l'oxydation des terpènes biogéniques^[10].

Selon l'AFSSET, les premiers polluants pouvant faire l'objet de propositions de VGAI sont le formaldéhyde, le benzène, le naphthalène, le phtalate de di(2-éthylhexyle) (DEHP), le dioxyde d'azote, l'acétaldéhyde, le trichloréthylène, le tétrachloroéthylène et l'ammoniac. La méthodologie prévoit 3 étapes : d'abord organiser les connaissances toxicologiques (toxicocinétique, mécanisme d'actions, effets sur la santé humaine), puis analyser la qualité des valeurs guides (VG) et des valeurs toxicologiques de référence (VTR) disponibles et enfin choisir la ou les VGAI à retenir parmi les valeurs de référence disponibles.

Par ailleurs, l'Agence recommande de mettre en place des processus réguliers de révision de la liste des substances ainsi que des valeurs guides déjà produites et de développer, dans un contexte normatif, des stratégies d'échantillonnage et de mesure pour vérifier le respect de ces valeurs guides dans différents environnements intérieurs.

Dans le cadre de cette étude, les valeurs guides ont d'ores et déjà été produites pour le formaldéhyde, le benzène et le monoxyde de carbone. En ce qui concerne le formaldéhyde, l'agence propose une VGAI court terme applicable sur deux heures et une VGAI pour une exposition long terme. Elles sont respectivement de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ sur 2 heures et de 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Pour le benzène, l'AFSSET propose des VGAI pour des expositions à court terme, intermédiaire et long terme, prenant en compte les effets hématologiques du benzène (e.g. toxicité sur les lymphocytes lors d'expositions à court terme ou intermédiaires, diminution du nombre de cellules sanguines et leucémie dans les cas d'exposition chronique) :

VGAI long terme

- Pour les effets hématologiques non cancérogènes :
 - - 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition supérieure à un an.
- Pour les effets hématologiques cancérogènes :
 - - 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition "vie entière", correspondant à un excès de risque de 10^{-5} .
 - - 0.2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition "vie entière", correspondant à un excès de risque de 10^{-6} .

(Dans ce cas, l'excès de risque correspond à la probabilité qu'une personne contracte le cancer si elle est exposée pendant toute sa vie. L'excès de risque de 10^{-5} se traduit par une personne sur cent mille personnes. L'excès de risque de 10^{-6} se traduit par une personne sur un million de personnes.)

VGAI Intermédiaire

- - 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne sur un an pour les effets hématologiques non cancérogènes prenant en compte des effets cumulatifs du benzène.

VGAI court terme

- - 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne sur 14 jours pour les effets hématologiques non cancérogènes prenant en compte des effets cumulatifs du benzène.

L'AFSSET recommande que l'ensemble des valeurs concernant les effets hématologiques non cancérogènes soit fixé comme objectif afin de protéger la santé humaine. Des expositions aiguës ou intermédiaires peuvent survenir dans des situations particulières, par exemple lors de travaux de rénovation. L'agence recommande par ailleurs :

- a) - la mise au point de protocoles métrologiques afin de vérifier le respect des valeurs guides de qualité d'air intérieur ;
- b) - des stratégies de surveillance et de gestion de la qualité de l'air intérieur s'appuyant sur les VGAI proposées ;
- c) - une sensibilisation et une information de la population générale à la problématique de la pollution de l'air intérieur afin de permettre une évolution des comportements, notamment lors des travaux d'aménagement, de rénovation ou de ménage ;
- d) - l'étude de l'impact économique et social du suivi du respect de ces valeurs ;
- e) - la mise en place d'études permettant une meilleure connaissance des expositions individuelles ;
- f) - l'étiquetage obligatoire des matériaux de construction et de décoration, en particulier sur la base des travaux de l'Agence publiés en octobre 2006 et intitulés "procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de COV et de critères sanitaires".

Des VGAI pour le trichloréthylène seront proposées par l'AFSSET très prochainement. D'une manière générale, il existe une série de normes ISO concernant divers polluants, accessibles auprès de l'Organisation Internationale de Normalisation référencées sous le nom "Air des lieux de travail".

Analyseur de gaz

Pour effectuer des mesures quantitatives des niveaux de COV, on commence par faire passer de l'air à travers un milieu adsorbant, choisi en fonction de son affinité pour les composants auxquels on s'intéresse. Le gaz capturé est alors désorbé et analysé par chromatographie en phase gazeuse (CPG) pour séparer les molécules du mélange, puis par spectrométrie de masse (MS) pour identifier les espèces chimiques.

Les instruments de CPG et de MS peuvent être assez onéreux, et un certain niveau de compétences est requis pour interpréter les données. Le moyen le plus facile est le moins coûteux pour obtenir une évaluation du niveau de COV reste donc de prélever des échantillons d'air et de les faire analyser par des laboratoires spécialisés.

Une façon alternative et moins onéreuse de connaître les niveaux de COV est de déterminer la concentration totale en COV dans l'air en utilisant un détecteur par photo-ionisation. Cet appareil est un instrument portatif utilisant une source UV afin d'ioniser des échantillons d'air. Une fois calibré, il peut détecter des niveaux de COV avec une précision de l'ordre de la ppb. Cependant, il n'est pas possible de distinguer différentes espèces chimiques.

2.4. La contamination biologique par voie aérienne

Dans son sens le plus large, la contamination biologique aéroportée inclut n'importe quel microorganisme pouvant être trouvé dans l'air, qu'il soit viable ou pas. Les sources biologiques de pollution intérieure sont nombreuses : les morceaux de peau, les cheveux décomposés, les acariens, les moisissures, les systèmes d'air conditionné, les plantes d'intérieur, la terre et les jardins environnants. En intérieur, le manque de circulation d'air permet à ces polluants aéroportés de s'accumuler plus qu'ils ne le feraient naturellement. Les préoccupations de santé relatives à ces polluants s'étendent des maladies et infections des poumons à l'asthme, en passant par la détérioration du système immunitaire. Un problème général est la légionellose, causée par une bactérie flottante, *Legionella*, qui se développe particulièrement dans les eaux stagnantes et tièdes. La voie première d'exposition est la formation d'aérosols, le plus souvent depuis des tours aéroréfrigérantes ou des pommeaux de douche. Une source fréquente de *Legionella* dans les buildings commerciaux provient des tours aéroréfrigérantes mal placées où mal entretenues, qui libèrent de l'eau sous forme d'aérosol pouvant potentiellement se retrouver au voisinage des entrées d'aération.

Les moisissures (aussi appelées "champignons microscopiques") font partie d'une grande variété de micro-organismes qui englobent notamment les champignons et les levures. Ces micro-organismes peuvent croître et se reproduire rapidement, produisant des spores (2 à 20 μm diamètre) et des mycéliums. Ils sont toujours présents dans l'air extérieur; et on en trouve aussi à l'intérieur des bâtiments. Ils peuvent pénétrer dans les bâtiments de plusieurs façons : par les portes ou les fenêtres, mais aussi via les vêtements, les animaux, la nourriture et les meubles. Les moisissures se forment et prolifèrent dans des milieux humides tels que le sous-sol, la salle de bain, la cuisine... Les produits celluloseux (bois, carton, papier peint ou placoplâtre...) constituent d'excellents supports à la croissance des moisissures, de même que tout amas de matières végétales ou de poussières organiques. Quand les moisissures se développent de façon importante, la dispersion des spores de moisissures dans l'air ambiant peut entraîner des problèmes de santé par simple inhalation ou contact cutané.

De plus, elles peuvent libérer, tout comme les bactéries, des toxines dangereuses pour la santé humaine. 5 à 10% de la population française (10 à 13% chez les enfants) est sensible aux allergènes de moisissures. Les moisissures sont susceptibles de déclencher des irritations des muqueuses, des maladies des voies respiratoires (toux, rhumes, éternuements, difficultés respiratoires), des crises d'asthme, des réactions allergiques telles qu'irritation de la peau, voire des effets plus toxiques avec les mycotoxines (fièvre, nausées, vomissements, état de fatigue, hémorragies pulmonaires) comme c'est le cas lors d'une exposition professionnelle (en milieu industriel ou agricole). Dans ce cas, deux grands types de situations professionnelles exposant à des risques biologiques sont à distinguer pour l'évaluation des risques professionnels :

- les situations où l'utilisation d'agents biologiques est délibérée car elle fait partie du procédé industriel (Poste de brossage de saucissons, par exemple),
- les situations d'exposition potentielle qui ne sont pas associées au procédé industriel mais qui accompagnent une activité particulière (contrôle microbiologique dans l'agroalimentaire ou maintenance en réseaux d'égouts, par exemple).

Bien que la prise de conscience de la contamination microbiologique de l'air ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années, aucune directive de niveaux maximaux d'innocuité n'a pour l'instant été établie. Mais

il convient de rappeler que la surveillance microbiologique de l'air, par prélèvement actif (aspiration d'air par un biocollecteur) et/ou passif (sédimentation sur boîte de Pétri), est généralement associée à des contrôles de surface (par géloses de contact). Dans le cadre de contrôles microbiologiques de routine, les recherches portent sur l'analyse quantitative de la flore aérobie mésophile totale.

En France, pour les établissements de santé, les niveaux de propreté bactériologique sont définis dans la **norme AFNOR NF S 90 351**^[1] et dans un guide technique de l'Association pour la Prévention et l'Etude de la Contamination (ASPEC) : "Contrôles de l'environnement dans les zones à hauts et très hauts risques infectieux". La norme AFNOR définit 3 classes de propreté microbiologique, à réception d'une nouvelle installation, voir Tableau 2.

Classe Bactériologique	Concentration maximale en nombre de particules viables par mètre cube d'air (UFC/m ³)
B100	100
B10	10
B5	5
B1	≤ 1

Tableau 2. Classes de propreté bactériologique définies dans la NF S 90 351. (L'unité UFC signifie Unité Formant Colonies).

Les industries telles que l'industrie agroalimentaire et l'industrie cosmétique, sont également confrontées à la maîtrise de contaminants microbiologiques. Ne disposant pas de textes spécifiques les concernant, ces industries mettent en place des démarches dites HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point), c'est-à-dire l'analyse des risques et des points critiques pour leur maîtrise. Ceci leur permet de définir leurs propres niveaux cibles ainsi que la fréquence optimale de contrôle microbiologiques.

Biocollecteurs

Les particules viables sont généralement fixées sur un support particulaire inerte. Dans l'air normal, elles appartiennent à différents groupes taxonomiques, avec des propriétés biologiques différentes en ce qui concerne leur survie lors des opérations de prélèvement et leur possibilité ultérieure de culture. Du point de vue physique, les particules viables se comportent comme des particules inertes. Pour les recueillir on a donc puisé dans les moyens utilisés en physique des aérosols. Mais leurs propriétés microbiologiques ont obligé à respecter des contraintes spécifiques, avec comme conséquence le développement d'appareillages spéciaux appelés "biocollecteurs". Les principes de ces contraintes sont :

- méthode de séparation du courant d'air minimisant les chocs sur le milieu de recueil, et les forces développées par le champ aérodynamique,
- conditions de prélèvement et méthodes de culture évitant de briser les agglomérats,
- utilisation d'un appareil stérilisable.

D'une façon générale, on peut distinguer deux types de collecteurs : ceux qui injectent l'air à grande vitesse directement sur le support de culture, et ceux qui font passer l'air à travers un fluide (Figure 2). Dans ce dernier cas, la solution obtenue peut être utilisée pour une mise en culture où analysée par des techniques chimiques (HPLC) ou moléculaires (Polymerase Chain Reaction -PCR).

La mise en œuvre des biocollecteurs est généralement simple et les notices explicites des constructeurs sont à suivre strictement. De plus, le standard international **ISO 14698**^[2] fournit des directives et des protocoles pouvant être suivis pour interpréter les résultats et émettre des conclusions, indépendamment de l'appareil utilisé.



Figure 2. : Photos de deux types de biocollecteurs : (a) un collecteur AGI-30 qui récupère les microorganismes dans une solution liquide ; (b) un collecteur à étages multiples qui sépare les particules en fonction de leur taille et les fait tomber directement sur le support de culture.

3. Les défis et les actions en cours

Pour les trois classes de polluants mentionnées ci-dessus, des travaux sont en cours afin de les quantifier de façon plus précise et de mieux comprendre les risques liés à leur exposition.

3.1. Particules en suspension

L'effort le plus significatif est celui qui s'est concentré sur les particules de taille nanométrique. Les méthodes interférométriques ne peuvent être employées pour cette gamme de taille et de nouveaux outils robustes et rentables sont nécessaires. Outre la difficulté de mesure, il faut également comprendre les risques que ces petites particules posent pour la santé. Même des substances généralement reconnues comme inertes, peuvent, à une taille de l'ordre du micron, avoir des effets inattendus, dus à la grande surface spécifique et à la pénétrabilité qu'elles acquièrent une fois réduites à une taille nanométrique.

3.2. Polluants chimiques

À cause des milliers de COV différents qui existent ainsi que de la multitude de réactions secondaires qui peuvent survenir entre eux, la recherche s'intensifie afin d'identifier à la fois les composés individuellement et les mélanges. Avec l'avènement de nouveaux systèmes électroniques, une gamme de capteurs de nouvelle génération est en cours de développement. Ce seront des capteurs personnels que l'on portera sur soi afin de mesurer en continu les niveaux d'exposition.

3.3. Polluants biologiques

Comme pour les polluants chimiques, on cherche actuellement à développer des bio-dosimètres individuels permettant de connaître l'exposition aux microbes aéroportés. De plus, les avancées des techniques d'identification moléculaire ont nourri un nouveau champ de recherche s'intéressant à l'aéro-génomique. Des connaissances précises sont accumulées afin de connaître l'empreinte génétique des microorganismes présents dans différents habitats.

En parallèle de tous ces efforts, se sont développées de nouvelles stratégies et technologies visant à contrôler les polluants de l'air intérieur et d'atténuer leurs effets. Ce domaine de recherche fera l'objet d'un prochain article dans cette revue.

4. Bibliographie

- [1] OMS, Air quality guidelines for Europe, second edition European series n°91, 2000
- [2] European Commission. Joint Research Centre (JRC). Final Report. Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU: The INDEX project. Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit. January, 2005a. I-21020 Ispra (VA), Italy.
- [3] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Document cadre et éléments méthodologiques, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [4] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Le monoxyde de carbone, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [5] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Le formaldéhyde, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [6] NF EN ISO 14644-1 : Salles Propres et environnements maîtrisés apparentés _ Partie 1 : Classification de la propreté particulaire de l'air, Juillet 1999.
- [7] Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) Campagne nationale Logements. Etat de la qualité de l'air dans les logements français. Rapport final, Novembre 2006.
- [8] M. Kulmala, "How particles nucleate and grow". Science, 2003, 302, 5647: 1000-1001.
- [9] M. Kulmala, H. Vehkamäki, T. Petäjä, M. Dal Maso, A. Lauri, V.-M. Kerminen, W. Birmili and P.H. McMurry, "Formation and growth rate of ultrafine atmospheric particles: a review of observations" Aerosol Science, 2004, 35: 143-176.
- [10] C.D. O'Dowd, P. Aalto, K. Hämeri, M. Kulmala and T. Hoffmann, "Atmospheric particles from organic vapours. Nature, 2002, 416: 497-498.
- [11] NF S 90-351: Etablissement de santé: salles propres et environnements maîtrisés et apparentés, Juin 2003.
- [12] ISO 14698 : "Salles propres et environnement maîtrisés apparentés – Maîtrise de la biocontamination – Partie 1 : Principes généraux", Septembre 2003.