



HAL
open science

Mémento Santé Bâtiment - Qualité de l'air intérieur

Marc O. Abadie, Patrice Blondeau, Jérôme Nicolle

► **To cite this version:**

Marc O. Abadie, Patrice Blondeau, Jérôme Nicolle. Mémento Santé Bâtiment - Qualité de l'air intérieur. LaSIE - Université de La Rochelle. Caisse des dépôts, pp.91, 2013. hal-01009964

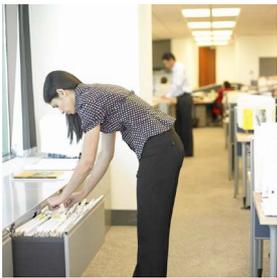
HAL Id: hal-01009964

<https://hal.science/hal-01009964>

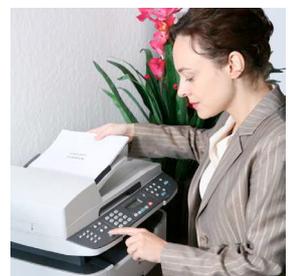
Submitted on 19 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémento Santé Bâtiment Qualité de l'air intérieur



Caisse
des Dépôts



Auteurs du mémento, Université de la Rochelle :

Marc Abadie
Patrice Blondeau
Jérôme Nicolle

Travail suivi par un groupe de travail composé de collaborateurs du groupe Caisse des Dépôts :

Laetitia Barre, SNI
Nicolas Blanc, Service développement durable
Henri Chapoutier, Icade
Benjamin Ficquet, Icade
Louis Henry, Service de la politique de la ville et du développement urbain
Frank Hovorka, Service développement durable
Agathe Pierot, Service développement durable

Sommaire

■ **Chapitre 1 : La problématique et les enjeux de la qualité de l'air dans les bâtiments** ▷ page 7

1. Une notion complexe et en perpétuelle évolution ▷ page 7

2. Des enjeux forts et multiples ▷ page 9

2.1 Les enjeux sanitaires ▷ page 9

2.2 Les enjeux économiques ▷ page 11

2.3 Les enjeux environnementaux ▷ page 12

■ **Chapitre 2 : Les polluants, leurs sources et leurs effets sur la santé** ▷ page 13

1. Les polluants gazeux ▷ page 14

1.1 Les composés gazeux inorganiques ▷ page 14

1.2 Le radon ▷ page 14

1.3 Les composés organiques volatils et aldéhydes ▷ page 16

2. Les particules et les fibres ▷ page 17

3. Les composés organiques semi-volatils ▷ page 19

4. Les bio-contaminants ▷ page 23

4.1 Les virus et les bactéries ▷ page 23

4.2 Les allergènes ▷ page 23

4.3 Les moisissures ▷ page 24

4.4 L'influence de l'humidité ▷ page 24

■ **Chapitre 3 : L'évolution temporelle des polluants** ▷ page 26

1. L'émission et l'élimination des polluants ▷ page 26

1.1 Les sources ▷ page 27

1.2 Le transport par l'air ▷ page 27

1.3 Les interactions avec les matériaux ▷ page 30

1.4 La réactivité dans l'air ▷ page 31

1.5 La filtration et l'épuration de l'air ▷ page 32

1.5.1 Les filtres à particules ▷ page 32

1.5.2 Les filtres moléculaires ▷ page 36

1.5.3 Le choix des filtres ▷ page 36

1.5.4 Les aspects énergétiques et le remplacement des filtres ▷ page 38

1.5.5 Les techniques et les systèmes d'épuration ▷ page 41

2. Quelques illustrations ▷ page 42

2.1 La variabilité de l'émission des sources de polluants ▷ page 42

2.2 L'interaction entre matériaux et polluants gazeux : illustration de l'effet tampon des matériaux ▷ page 44

2.3 La concentration intérieure en particules d'une ambiance ▷ page 45

Sommaire

■ **Chapitre 4 : Les méthodes d'évaluation de la QAI et la hiérarchisation des polluants** ▷ **page 48**

- 1. L'évaluation des risques** ▷ **page 48**
 - 1.1 Les composés toxiques et allergènes ▷ **page 48**
 - 1.2 Les composés cancérogènes ▷ **page 51**
 - 1.3 Les perturbateurs endocriniens ▷ **page 51**
- 2. Les indices de la Qualité de l'Air Intérieur** ▷ **page 53**
- 3. La hiérarchisation des polluants** ▷ **page 55**

■ **Chapitre 5 : La réglementation** ▷ **page 57**

- 1. La réglementation existante** ▷ **page 57**
 - 1.1 L'aération et la ventilation ▷ **page 57**
 - 1.2 L'amiante ▷ **page 57**
 - 1.3 Le monoxyde de Carbone ▷ **page 58**
 - 1.4 Le radon ▷ **page 59**
 - 1.5 L'étiquetage des produits de construction et de décoration ▷ **page 61**
- 2. Les évolutions prévues** ▷ **page 62**
 - 2.1 Les valeurs-guides pour l'air intérieur ▷ **page 62**
 - 2.2 La surveillance de la QAI ▷ **page 63**
 - 2.3 Un regard vers la réglementation à l'échelle internationale ▷ **page 64**

■ **Chapitre 6 : La métrologie** ▷ **page 66**

- 1. Les polluants gazeux radioactifs** ▷ **page 66**
- 2. Les polluants gazeux inorganiques** ▷ **page 66**
 - 2.1 Le dioxyde de carbone ▷ **page 66**
 - 2.2 Le monoxyde de carbone ▷ **page 67**
 - 2.3 Les oxydes d'azote ▷ **page 67**
 - 2.4 L'ozone ▷ **page 67**
- 3. Les polluants gazeux organiques** ▷ **page 68**
 - 3.1 Les aldéhydes ▷ **page 68**
 - 3.2 Les composés organiques volatils ▷ **page 69**
 - 3.3 Les composés organiques semi-volatils ▷ **page 70**
- 4. Les polluants particuliers** ▷ **page 71**
 - 4.1 Les particules et nanoparticules ▷ **page 71**
 - 4.2 Les fibres ▷ **page 72**
- 5. Les polluants biologiques** ▷ **page 73**
 - 5.1 Les allergènes ▷ **page 73**
 - 5.2 Les moisissures, bactéries et pollens ▷ **page 74**

■ Synthèse et recommandations ▷ page 75

■ Fiches pour intervenants ▷ page 76

1. **Maître d'ouvrage** ▷ page 76
2. **Maître d'œuvre** ▷ page 77
3. **Gestionnaire/Exploitant** ▷ page 78
4. **Utilisateurs** ▷ page 79

■ Glossaire ▷ page 80

■ Références bibliographiques ▷ page 82

■ **Annexe 1 : Modalité de calcul de l'indice IAPI** ▷ page 85

■ **Annexe 2 : Réglementation existante sur l'aération et la ventilation** ▷ page 88

La qualité de l'air intérieur (QAI) constitue une thématique de santé environnementale dont l'enjeu sanitaire n'est désormais plus à démontrer. L'interdiction de l'amiante dans les bâtiments (1994), la création de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (2001), l'arrêté radon (2004), l'interdiction de fumer dans les lieux publics (2006), l'adoption du règlement européen REACH (2007), ou plus récemment l'entrée en vigueur de l'étiquetage obligatoire des caractéristiques d'émission des matériaux de construction/décoration (2012), sont autant de mesures qui témoignent de la prise de conscience du problème par les pouvoirs publics, et de la volonté forte d'agir pour réduire à brève échéance l'exposition des populations.

Sans doute par l'effet conjugué de la médiatisation croissante d'un certain nombre de problèmes liés à la qualité de l'air intérieur, et de la publicité faite autour de produits destinés à l'améliorer (épureurs, matériaux, systèmes de ventilation, ...), la question de la qualité de l'air dans les logements et sur les lieux de travail suscite dorénavant aussi un intérêt de la part du grand public et des acteurs de la construction. Ainsi, dans un sondage réalisé en 2008 par l'IFOP, 80 % des français se déclaraient préoccupés par la qualité de l'air intérieur, et 90 %, dont une majorité de femmes, établissaient un lien entre qualité de l'air dans leur logement et santé. Le même sondage révélait par ailleurs une augmentation régulière des demandes de conseil auprès des bureaux d'étude spécialisés pour la conception énergétique mais aussi sanitaire des ensembles de bureaux et des ERP.

A ce sujet, il convient de rappeler que si l'accomplissement de bâtiments économes en énergie relève désormais de l'obligation réglementaire, ceci ne saurait se faire au détriment du confort et de la qualité de l'air offerte à leurs usagers. Le secteur de la construction entame en 2012 une mutation profonde par la systématisation des bâtiments basse consommation (BBC, c'est-à-dire consommant moins de 50 kWh d'énergie primaire par m² et par an), qui ne bénéficiaient jusqu'à présent que d'un label distinctif, et une perspective d'instauration du bâtiment à énergie positive (BEPOS) comme standard réglementaire à l'horizon 2020. Outre l'intégration massive des énergies renouvelables, la réalisation de ces nouveaux objectifs réglementaires passe inévitablement par la généralisation de pratiques constructives visant l'efficacité énergétique – isolation, matériaux, étanchement, ventilation, récupération de chaleur, ... – qui peuvent aller à l'encontre de la santé et du bien être des occupants. Des garde-fous ont été posés pour ce qui concerne les conditions thermiques d'ambiance, comme par exemple une température intérieure conventionnelle à ne pas dépasser en été, mais, sans doute faute de données objectives et consensuelles, aucune mesure d'accompagnement de la RT2012 n'a été prise pour garantir une qualité de l'air satisfaisante aux usagers. Afin de ne pas dupliquer à grande échelle des pratiques qui pourraient à terme s'avérer nuisibles à la santé des usagers, mais au contraire pour poursuivre les efforts entrepris depuis plus de dix ans pour l'amélioration de la qualité de l'air dans les lieux de vie, il est indispensable d'intégrer la composante sanitaire dès la phase de conception du bâtiment.

En dépit des zones d'ombre qui subsistent toujours sur les déterminants de la pollution de l'air intérieur, il ne fait en effet aucun doute que la clé de la réussite des politiques publiques mises en place dans le secteur du bâtiment est de concilier performance énergétique et qualité de l'air intérieur, alors que ces deux composantes apparaissent souvent comme étant antinomiques. Il s'agit là d'un véritable défi à relever pour tous les acteurs de la construction, auxquels s'adresse ce document. Sans prétendre à l'exhaustivité, le mémento fournit en premier lieu un certain nombre d'éléments utiles à la compréhension de la problématique et de ses enjeux. Il présente ensuite le cadre réglementaire actuel et à venir, ainsi que les méthodes et les outils disponibles, ou en cours de développement, pour effectuer un diagnostic de qualité de l'air et concevoir des bâtiments sains pour leurs occupants.

Chapitre 1

La problématique et les enjeux de la qualité de l'air dans les bâtiments

1. Une notion complexe et en perpétuelle évolution

L'évolution de la pollution atmosphérique fait depuis très longtemps l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs publics qui, à travers la promotion d'études scientifiques, le développement de modèles de prédiction (modèle Prév'Air par exemple pour la prédiction en temps réel des concentrations en ozone sur le territoire européen) et la création des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) se sont aujourd'hui dotés de moyens pour caractériser et appréhender correctement les problèmes. Parallèlement à cela, la qualité de l'air intérieur a longtemps été considérée comme une composante marginale des problématiques environnementales, et une préoccupation mineure dans le domaine du bâtiment. La prise de conscience collective de son impact potentiel sur la santé, qui peut être considérée comme l'acte de naissance de la thématique, date du début des années 1980, époque où ont été constatées les premières pathologies du bâtiment et les premiers désordres sanitaires résultant du confinement accru des locaux par l'application des premières réglementations thermiques. C'est en réponse à ces problèmes qu'a notamment été instaurée la réglementation sur la ventilation des bâtiments qui fait toujours référence actuellement, à savoir les arrêtés du 24 Mars 1982 et du 28 Octobre 1983 pour ce qui concerne les logements, les articles R 232-5 du code du travail pour les locaux à pollution non spécifique occupés par des salariés, et le règlement sanitaire départemental type pour les locaux accueillant du public. Ces textes définissent à la fois les conditions pour lesquelles la mise en place d'une ventilation mécanique est obligatoire, et les débits minimaux d'air neuf à introduire dans les locaux en fonction de leur usage. Ces derniers ont en l'occurrence été déterminés sur la base de préoccupations d'ordres énergétique (maîtrise des consommations énergétiques afférentes au renouvellement d'air en période de chauffage) et sanitaire, en retenant deux marqueurs de la pollution de l'air que sont :

- ▷ L'humidité, qu'il convient de maintenir dans des limites raisonnables pour des questions de santé, mais aussi de confort et de préservation du bâti ;
- ▷ Les bio-effluents, c'est-à-dire l'ensemble des composés émis par le corps, qui peuvent être à l'origine d'inconforts olfactifs.

Ce concept historique de maîtrise de la qualité de l'air intérieur est aujourd'hui partiellement remis en cause, ceci pour plusieurs raisons.

La première tient au constat corroboré par la récente publication des premiers résultats de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) que les sources de pollution internes aux bâtiments sont à la fois nombreuses et variées, et que l'on y trouve par conséquent une multitude d'espèces dont la présence prête à questionnement ; près de 800 substances physico-chimiques et agents biologiques sont ainsi répertoriés comme des polluants des ambiances intérieures, les composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) pouvant à eux seuls regrouper 600 espèces différentes. Dans ce contexte, l'appréhension de la qualité de l'air sur la seule base des concentrations en bio-effluents et de l'humidité ambiante apparaît restrictive.



La seconde raison est que l'humidité et les bio-effluents ciblent les occupants comme principale origine de la pollution de l'air intérieur. Sans que tous les déterminants de la qualité de l'air intérieur et que leur contribution aux concentrations ambiantes ne soient connus, les campagnes de mesures réalisées dans différents lieux de vie montrent pourtant qu'en de nombreuses circonstances, la pollution provient majoritairement des émissions par le bâtiment lui-même (matériaux de construction et de décoration), par ses équipements, et par les activités liées à son entretien.

Enfin, face aux épisodes de pollution atmosphérique à l'ozone, aux oxydes d'azote ou aux particules en suspension dont se font de plus en plus fréquemment écho les médias, la notion de ventilation basée sur le principe de dilution de l'air intérieur vicié par de l'air extérieur dénué de polluants (air neuf), prête à questionnement : en zones urbaine et périurbaine, la ventilation est susceptible de constituer un vecteur de pollution des ambiances intérieures, ce qui ne fait qu'ajouter à la complexité du problème, et d'une certaine manière au désarroi des acteurs de la construction.

D'une manière générale, tous ces éléments convergent vers la question de la définition de la qualité de l'air intérieur, qui est une notion aux multiples facettes. L'évocation des bio-effluents comme polluants des environnements intérieurs rappelle en premier lieu que la qualité de l'air peut être abordée sous deux angles distincts, à savoir la santé et le confort (olfactif). Bien qu'il soit légitime de penser que les aspects sanitaires doivent primer, la composante olfactive ne doit pas pour autant être négligée, d'une part parce qu'il s'agit du biais par lequel les occupants perçoivent concrètement la qualité de l'air, et d'autre part parce qu'en dépit de la forte subjectivité de l'olfaction, les odeurs corporelles peuvent assez aisément être tracées par la mesure des concentrations en CO₂ dans les pièces. L'occasion est d'ailleurs ici donnée d'insister sur le fait que dans le contexte du bâtiment, le CO₂ est un marqueur du confinement, c'est-à-dire de l'adéquation entre la densité d'occupation et le renouvellement d'air ; ses concentrations, mêmes élevées, ne présagent pas directement d'un quelconque risque sanitaire. Précisément, la difficulté de l'évaluation des risques sanitaires résulte de la multiplicité des polluants présents en mélange dans les ambiances intérieures, et de la variabilité spatio-temporelle de leurs concentrations. Sans même évoquer les effets synergétiques potentiels entre toutes ces espèces, ces caractéristiques confèrent au problème une dimension multicritère qui ne permet pas toujours de discerner les situations les plus favorables du point de vue de la qualité de l'air, et de juger de la pertinence de solutions techniques. Dans un environnement atmosphérique pollué par l'ozone, doit-on par exemple choisir de maintenir les fenêtres fermées ou de réduire la ventilation pour maintenir un niveau de concentration faible à l'intérieur, et accepter en retour une augmentation des concentrations en aldéhydes ou en toluène, qui sont principalement d'origine intérieure ? La réponse n'est pas évidente, et ne sera qui plus est pas nécessairement la même suivant les populations cibles (enfants, asthmatiques, ...). Dans le même ordre d'idée, les épurateurs d'air photocatalytiques peuvent contribuer à réduire de manière très significative les concentrations intérieures en COV, mais présentent un risque de production d'aldéhydes dans l'air : connaissant cela, doit-on préférer une ambiance avec 30 µg/m³ de benzène et 5 µg/m³ de formaldéhyde, ou la même ambiance avec 10 µg/m³ de chacune des substances ? Une fois encore, il est difficile de trancher... Les connaissances toxicologiques progressent, ce qui ouvre la voie à l'élaboration de méthodes de hiérarchisation des polluants et laisse entrevoir des perspectives intéressantes quant à la qualification objective de la qualité de l'air des ambiances intérieures multi-polluées. Un optimisme mesuré est néanmoins de rigueur si l'on considère que les connaissances acquises contribuent également à faire évoluer le problème : la nature de la pollution change par le biais des progrès technologiques, mais aussi de la réglementation, qui en même temps qu'elle éradique certaines substances jugées dangereuses, en fait émerger d'autres, utilisées comme substituts dans les produits de construction et de consommation.

2. Des enjeux forts et multiples

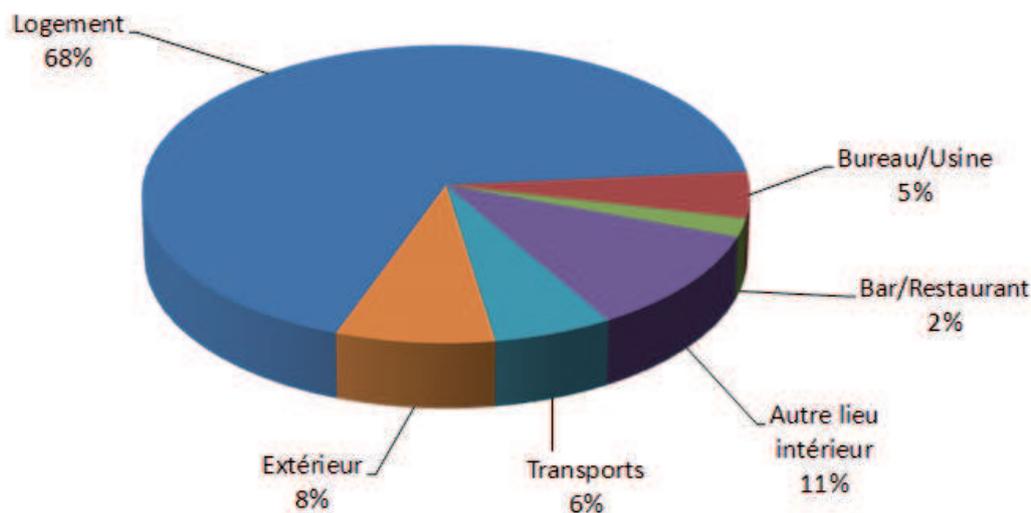
Les enjeux relatifs à la qualité de l'air intérieur sont de trois ordres : sanitaires, économiques et environnementaux.

■ 2.1. Les enjeux sanitaires

L'importance des enjeux sanitaires résulte de la forte contribution des environnements intérieurs à l'exposition des populations dans les pays industrialisés (on ne traitera pas ici des pays en voie de développement pour lesquels la qualité de l'air intérieur est pourtant reconnue comme un facteur de surmortalité majeur). Toutes les enquêtes sur les budgets espace-temps des populations confirment en effet que les personnes passent en moyenne plus de 80 % de leur temps à l'intérieur d'espaces clos (Figure 1), en particulier dans leur logement (Figure 2), avec il est vrai une certaine variabilité suivant l'âge et le sexe (Kirchner, 2011). De fait, le niveau de pollution dans ces micro environnements détermine majoritairement l'exposition globale des populations à la plupart des polluants de l'air (Figure 3).

Les effets sur la santé de la pollution de l'air en général, et de la pollution de l'air intérieur en particulier, ne sont plus à démontrer. Dans le cadre d'un projet de recherche européen baptisé EnVIE (De Oliveira Fernandes *et al.*, 2009), une analyse exhaustive des études épidémiologiques sur le sujet a été effectuée afin d'identifier les polluants de l'air impliqués dans le développement de quatre maladies jugées d'intérêt prioritaire en Europe. Les résultats sont présentés en Figure 4. Outre la confirmation des extrêmes méfaits du tabagisme actif ou passif, ils montrent que la plupart des espèces incriminées sont essentiellement ou exclusivement émis par des sources internes au bâtiment.

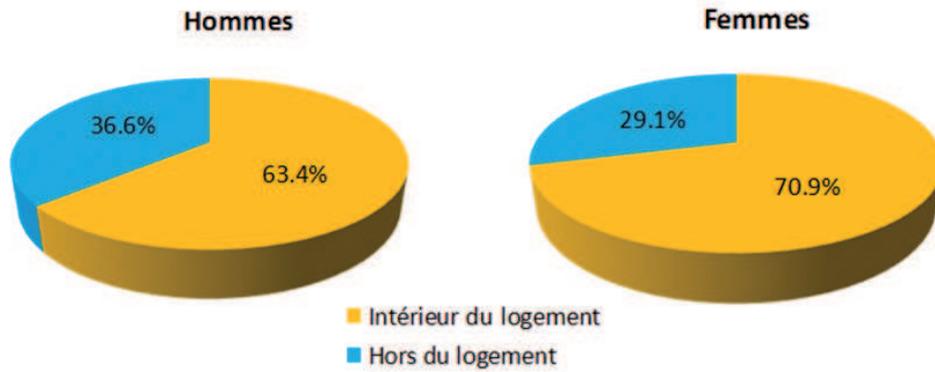
Figure 1 : Budget espace-temps de la population américaine, d'après Kleipeis et al. (2001) – échantillon de 9386 personnes de tous âges (dont 65 % de 18 à 64 ans) réparties sur 48 états américains.



« Les personnes passent plus de 80 % de leur temps à l'intérieur d'espace clos. »

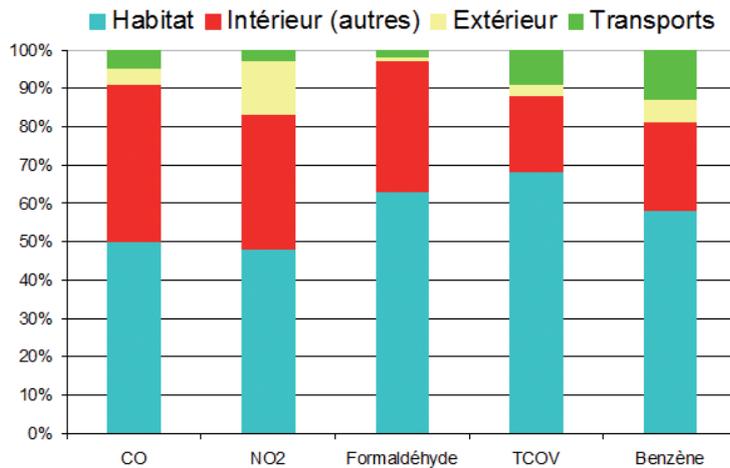


Figure 2 : Temps passé par la population française dans son logement, d'après les résultats de l'OQAI (d'après Kirchner, 2011).



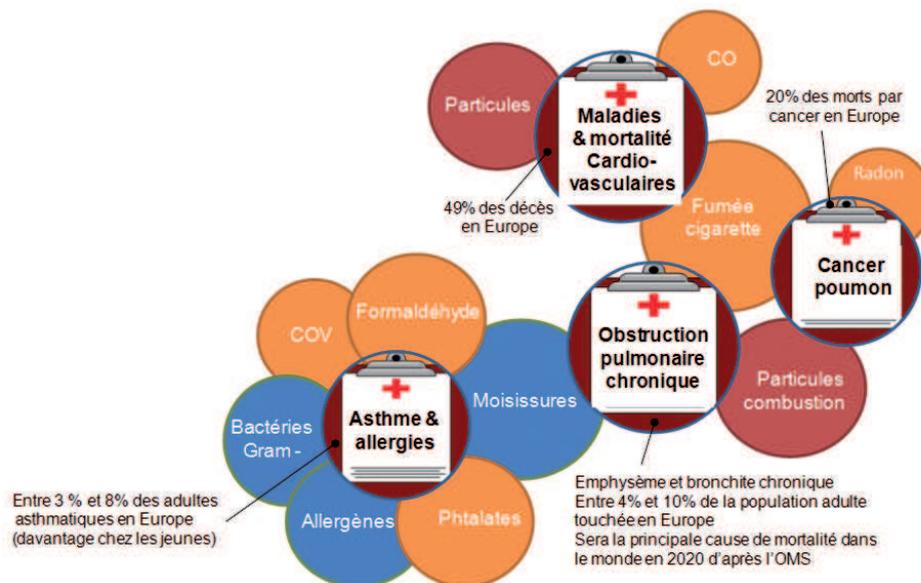
« Les personnes passent près de 67 % de leur temps en moyenne à l'intérieur de leur logement. »

Figure 3 : Distribution de l'exposition moyenne à quelques polluants de l'air, d'après Crump *et al.* (1999).



« L'exposition des personnes est fortement dépendante des niveaux de concentration des polluants à l'intérieur des espaces clos. »

Figure 4 : Recensement des polluants impliqués dans le développement de quatre maladies jugées d'intérêt prioritaire en Europe – Projet EnVIE (de Oliveira Fernandes, 2009).



« Devant la pollution extérieure, la fumée de cigarettes et les autres sources intérieures de polluants sont les principaux responsables du développement des maladies cardio-vasculaires, du cancer du poumon, de l'obstruction pulmonaire chronique, de l'asthme et des allergies.

■ 2.2. Les enjeux économiques

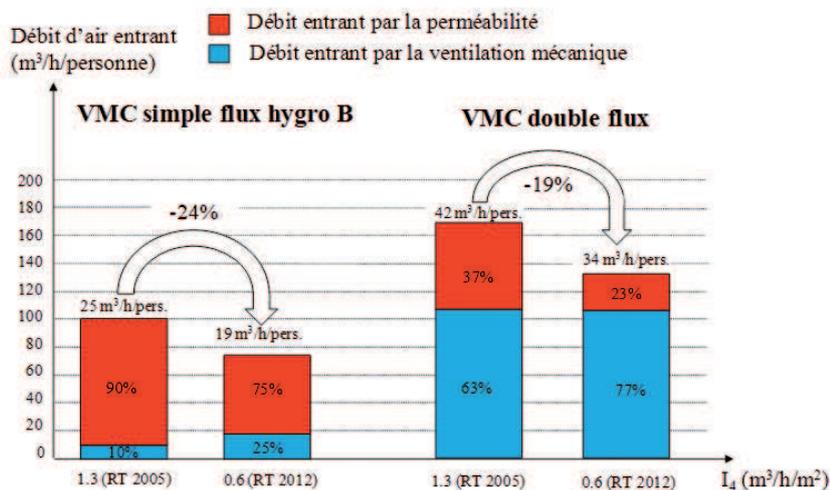
Le coût financier de la qualité de l'air intérieur peut être abordé sous deux angles. Le premier, d'ordre privé, se rapporte aux questions de productivité et d'absentéisme au travail. Plusieurs études, essentiellement américaines et scandinaves, se sont ainsi attachées à corréler la productivité et l'absentéisme au travail aux conditions de travail des salariés (confort thermique, pollution, bruit, ...), puis à chiffrer sur cette base les pertes financières occasionnées par des conditions d'ambiance dégradées. Concernant la question spécifique de la qualité de l'air intérieur, Fisk et al. (2009) et Seppanen et al. (2006), ont ainsi établi des corrélations entre le risque de symptômes sanitaires ou la performance au travail, et le débit de ventilation des locaux. Milton et al. (2000) ont pour leur part chiffré à 1,6 jour/an/personne l'augmentation des congés maladies quand le débit de ventilation était abaissé de 24 l/s/personne à 12 l/s/personne. Dans un registre similaire, Wargocki et Wyon (2007a et 2007b) se sont quant à eux intéressés à la relation entre performance d'apprentissage dans les écoles et ventilation/température des salles de classe.

Les aspects économiques liés à la qualité de l'air intérieur doivent aussi et surtout être appréhendés à la lumière des coûts qu'ils représentent pour la société publique. En lien avec les éléments énoncés ci-dessus, les congés maladie sont en grande partie pris en charge par l'assurance maladie. Plus largement, les dépenses afférentes aux soins médicaux et au traitement des maladies résultant d'une qualité de l'air défectueuse sur les lieux de travail ou au domicile, sont essentiellement supportés par le système de santé publique. Chouaid et al. (2004) ont ainsi montré qu'en 2004, l'asthme concernait 3,5 millions de personnes en France et que son coût était estimé à 1,5 milliards d'euros/an. S'il existe des facteurs génétiques prédisposants, il est aussi avéré que la prévalence de l'asthme et des allergies respiratoires est fortement corrélée à l'humidité et à la présence de certains polluants dans les logements (chapitre II.4.4). A une époque où la réduction des déficits publics est au cœur des débats politiques, et où dans le même temps les statistiques montrent une très forte recrudescence de l'allergie en France comme dans le reste de l'Europe - 3 % de la population allergique en France en 1970, 33 % en 2010, et une prévision de 50 % en 2020 selon un article paru dans le journal le Monde du 26/09/2009 – on perçoit aisément l'importance que peuvent revêtir les mesures d'amélioration de la ventilation et de la qualité de l'air dans les bâtiments.

■ 2.3. Les enjeux environnementaux

La maîtrise de la qualité de l'air intérieur constitue un enjeu environnemental majeur. Pour comprendre cela, il convient de rappeler que dans le cadre des mesures prises pour lutter contre le réchauffement climatique, les exigences en matière d'isolation des bâtiments et de performance des systèmes énergétiques ont été considérablement renforcées au cours de ces dernières années, notamment à travers les évolutions successives de la réglementation thermique des bâtiments. Pour des raisons de salubrité évidentes, et même si des efforts en termes de maîtrise des débits de ventilation et de contrôle de l'étanchéité des enveloppes ont été demandés, les réglementations en matière de ventilation des locaux ont en revanche très peu évolué. De ce fait, pour un bâtiment conforme à la RT 2012 et suivant le climat, les déperditions par renouvellement d'air peuvent désormais représenter 50 % à 70 % des déperditions totales. Pour poursuivre les efforts d'économies d'énergie (systématisation des bâtiments à énergie positive, BEPOS, à l'horizon 2020), et atteindre les objectifs très ambitieux que s'est fixée la France dans le secteur du bâtiment (division par 4 à l'horizon 2050, l'année de référence étant 2005), le législateur doit désormais trouver des solutions pour réduire les charges climatiques liées au renouvellement d'air. Plusieurs voies peuvent être envisagées, de mesures simples visant l'amélioration de l'efficacité des systèmes de ventilation ou de la récupération de chaleur sur l'air extrait, à des mesures beaucoup plus radicales consistant en une révision à la baisse des débits de ventilation réglementaires. Il est toutefois bien évident que ce deuxième type de mesures ne peut être entrevu sans mise en place de garde-fous concernant la qualité de l'air intérieur. Des simulations aérodynamiques ont ainsi déjà démontré que le renforcement de l'exigence d'étanchéité à l'air des enveloppes par l'instauration de la RT2012 ($I_4 \text{ max} = 0,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ contre $1,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ précédemment pour les logements individuels), contribuait à réduire de 20 à 25 % le renouvellement d'air des maisons suivant le système de ventilation mis en œuvre (Figure 5). Sans compensation par un contrôle accru des sources d'émissions internes, cela signifie une hausse mécanique des concentrations en polluants du même ordre de grandeur. Puisqu'il ne s'agit en aucun cas de sacrifier la qualité de l'air sur l'autel de la performance énergétique, mais bien de trouver le meilleur compromis entre consommation et confort/santé des usagers, on mesure ici tout le sens des dispositions réglementaires telles que l'interdiction de fumer dans les lieux publics, l'étiquetage obligatoire des caractéristiques d'émission des matériaux, qui sera prochainement étendue aux produits de consommation courante, ou le futur contrôle obligatoire de la qualité de l'air dans les établissements recevant du public. Sur le plan technique, ce contexte pointe l'intérêt que pourrait revêtir l'utilisation de systèmes d'épuration en complément de la ventilation. Le chapitre III.1.5.5 présente les différentes techniques d'épuration de l'air en fonction de la nature des polluants visés.

Figure 5 : Mise en évidence de la réduction du renouvellement d'air induite par le renforcement de l'exigence d'étanchéité de l'enveloppe par la RT2012 (d'après CVC n°872, 2012) – Simulation avec le code SIREN d'une maison de 80 m² occupée par 4 personnes.



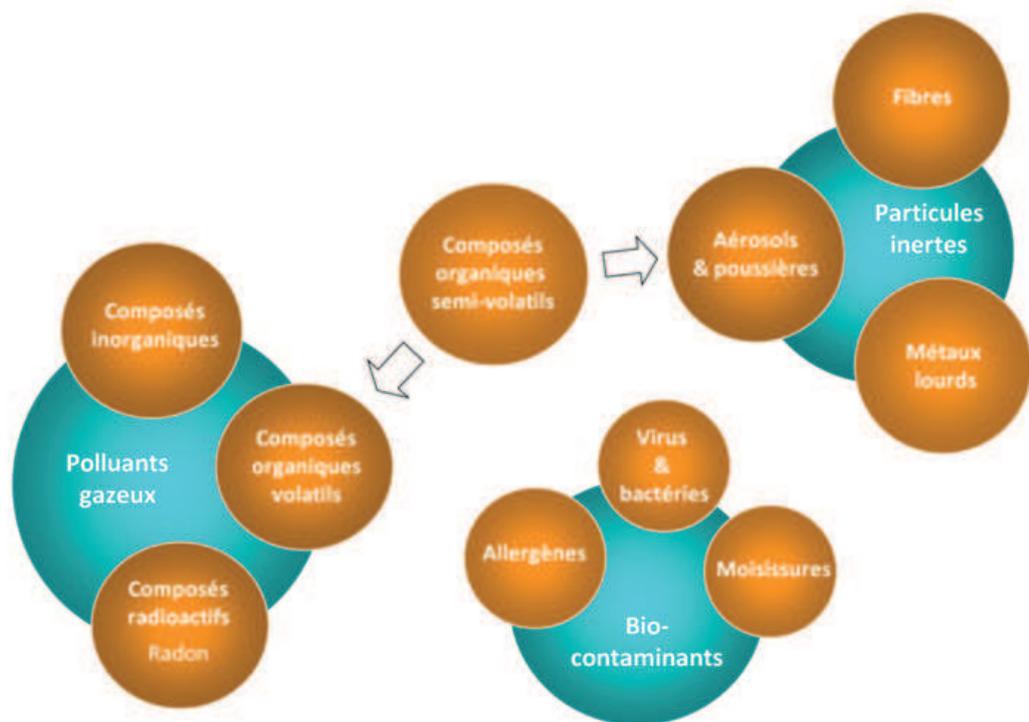
« Réduire les infiltrations sans augmenter les débits de ventilation conduit à une détérioration de la qualité de l'air intérieur. »

Chapitre 2

Les polluants, leurs sources et leurs effets sur la santé

Les polluants des ambiances intérieures peuvent être classés en distinguant dans un premier temps les composés gazeux, aussi appelés polluants chimiques ou moléculaires, des particules inertes et des bio-contaminants. Suivant les objectifs de l'étude, modélisation ou évaluation de la qualité de l'air dans une ambiance, il est ensuite possible de faire apparaître d'autres niveaux d'arborescence en identifiant des sous-groupes de polluants qui présentent des caractéristiques similaires quant à leurs propriétés de transfert, ou à la nature des pathologies induites par exemple. Il peut toutefois s'avérer difficile en certaines circonstances de dissocier pleinement chacune des catégories ou sous-catégories de polluants identifiées sur la base de tels critères. Ainsi, dans la classification proposée en **Figure 1**, les composés organiques semi-volatils (COSV) peuvent indifféremment être rattachés à la catégorie des polluants gazeux ou particulaires: de par leur température d'ébullition élevée, ces composés présentent en effet la particularité de coexister sous formes condensée (aérosol liquide) et gazeuse à température ambiante. Pour appréhender correctement l'exposition des occupants à ces substances, il est donc nécessaire de procéder à la fois à des analyses d'air et de poussières.

Figure 1 : Exemple de classification des polluants de l'air intérieur suivant une arborescence à deux niveaux.



« On peut distinguer trois grandes familles : les gaz, les particules inertes et les bio-contaminants. Une exception, les composés organiques semi-volatils se présentent à la fois sous forme de gaz et de particules. »



1. Les polluants gazeux

■ 1.1. Les composés gazeux inorganiques

Les oxydes d'azote (NO, NO₂), l'ozone (O₃) et le monoxyde carbone (CO) sont des polluants atmosphériques bien connus qui pénètrent dans les bâtiments par la ventilation ou l'infiltration d'air à travers l'enveloppe. Ces composés peuvent toutefois également être émis directement dans les environnements intérieurs, par les combustions de toutes sortes (tabagisme, appareils de chauffage fixes ou d'appoint, encens, activités de cuisine, etc...) dans le cas des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone, et par les imprimantes et les photocopieurs dans le cas de l'ozone.

Du point de vue sanitaire, les oxydes d'azote et l'ozone constituent des irritants des voies respiratoires : ils diminuent la fonction respiratoire et aggravent les maladies respiratoires chroniques telles que l'asthme et les allergies. Le monoxyde de carbone est pour sa part un poison sanguin d'autant plus dangereux qu'il est totalement inodore, même à très fortes concentrations. Sa toxicité résulte de son affinité à se fixer sur les globules rouges, qui est 270 fois supérieure à celle de l'oxygène. Les molécules de CO inhalées se lient à l'hémoglobine, ou chassent l'oxygène lié à l'hémoglobine, pour former un composé stable appelé carboxyhémoglobine. L'anoxémie (baisse de l'oxygène sanguin) qui en résulte conduit à un défaut d'approvisionnement en oxygène des organes, en particulier le cœur et le cerveau, qui peut se traduire par des symptômes bénins (nausée, fatigue, maux de tête, difficultés de mémorisation et de concentration) à graves (syncope, coma puis asphyxie complète et décès) suivant le niveau de concentration en CO dans l'air. Près de 5000 personnes sont victimes d'intoxications au CO chaque année en France, et les services médicaux enregistrent toujours près de 90 décès par an, hors suicides et incendies. L'exposition chronique au monoxyde de carbone à plus faible concentration dans l'air est aussi connue comme ayant des effets cardiovasculaires.

■ 1.2. Le radon

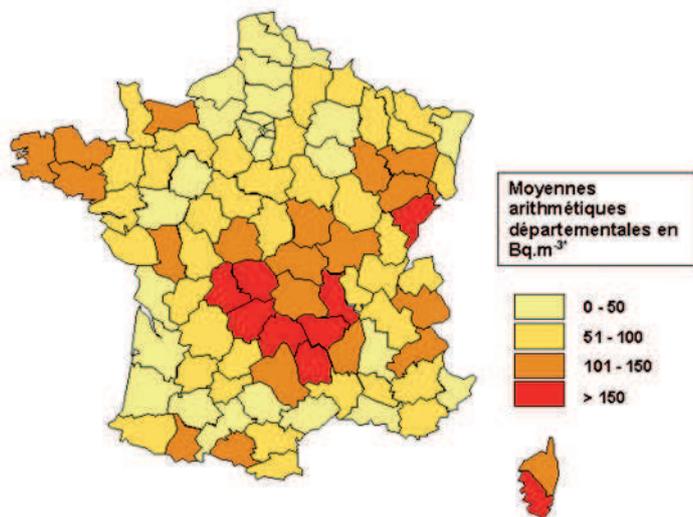
Le radon est un gaz inodore à l'origine de ce que l'on appelle communément la radioactivité naturelle. Principalement issu de la désintégration de l'uranium contenu dans la croûte terrestre, le radon 222 diffuse vers la surface puis est émis dans l'air. En se désintégrant à leur tour, les molécules de radon émettent des particules alpha, qui constituent une première voie d'exposition au radon pour l'homme, par rayonnement ionisant. Les descendants du radon, polonium 218, plomb 214, bismuth 214, polonium 214 et finalement plomb 206 (espèce stable), sont eux aussi des composés radioactifs, à faible durée de vie, qui se retrouvent présents dans l'air sous formes de poussières suffisamment fines pour passer à travers les voies respiratoires supérieures. Ce processus constitue donc une deuxième voie d'exposition au radon, par inhalation.

Le radon peut investir les environnements intérieurs par la ventilation, par l'utilisation de matériaux de construction contenant du radon, par les puits et les égouts (le radon est très soluble dans l'eau), mais aussi et surtout par diffusion directe depuis le sol à travers la dalle et les défauts d'étanchéité des bâtiments.

La pollution intérieure par le radon s'exprime à travers son niveau d'activité volumique, en becquerels par mètre cube d'air (Bq/m³). En France, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) a procédé de 1982 à 2000 à une campagne nationale de mesures dans les logements qui s'est traduite par la réalisation de plus de 12 000 mesures couvrant l'ensemble des départements métropolitains. Cette campagne a permis d'établir la carte présentée en lien avec la [Figure 2](#), qui, sans surprise, révèle que les plus forts niveaux d'activité du radon sont enregistrés dans les zones géographiques correspondant aux massifs anciens. La moyenne arithmétique nationale et la médiane sont respectivement égales à 90 Bq/m³ et 50 Bq/m³, ce qui positionne la France au niveau de pays tels que la Suisse, l'Allemagne ou l'Espagne. Par extrapolation des mesures réalisées aux caractéristiques de l'habitat en France, il ressort surtout de ces chiffres que près de 300 000 habitations individuelles en France présenteraient un niveau d'activité supérieur à 400 Bq/m³, seuil au-delà duquel l'Union Européenne estime qu'il est nécessaire d'entreprendre des actions pour réduire l'exposition des occupants.



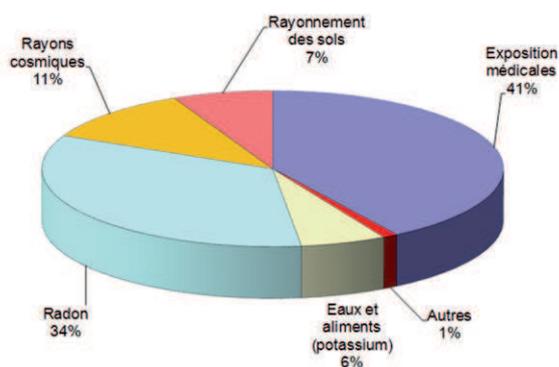
Figure 2 : Carte des activités volumiques du radon dans les habitations (source : IRSN).



« Les niveaux d'activité du radon sont les plus forts dans les zones géographiques correspondant aux massifs anciens. »

Du point de vue sanitaire, le radon constitue en France la deuxième source d'exposition aux rayonnements ionisants après l'imagerie médicale (Figure 3). Dans de nombreux pays, le radon constitue la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime ainsi que 3 à 5 % des cancers du poumon sont directement imputables au radon dans les zones à faible exposition (25 Bq/m³), et que le radon est responsable de 9 à 17 % de ces cancers dans les zones à plus forte exposition (100 Bq/m³) (WHO, 2000).

Figure 3 : Répartition moyenne des différents vecteurs d'exposition aux rayonnements ionisants de la population française (source DGUHC / DGS)



« Le radon est la deuxième voie d'exposition aux rayonnements ionisants après l'imagerie médicale. » II.1.3 Les composés organiques volatils et aldéhydes
Les composés organiques volatils (COV) sont des molécules contenant des atomes de carbone et d'hydrogène (hydrocarbures), auxquelles s'ajoutent II.1.3

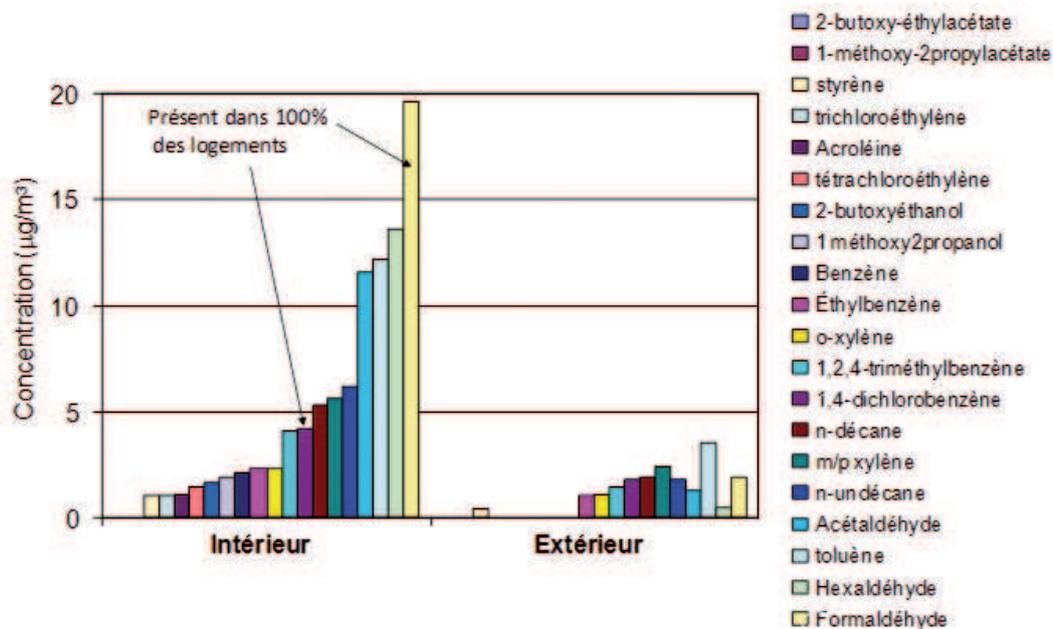
■ 1.3. Les composés organiques volatils et aldéhydes

Les composés organiques volatils (COV) sont des molécules contenant des atomes de carbone et d'hydrogène (hydrocarbures), auxquelles s'ajoutent éventuellement des atomes d'oxygène (composés carbonylés) ou de chlore (composés halogénés), et qui présentent une température d'ébullition comprise entre 50°C et 240°C. La famille des COV regroupe dans les faits plusieurs centaines d'espèces pour lesquelles les sources d'émission internes aux bâtiments sont multiples et n'ont d'ailleurs probablement pas été toutes recensées à ce jour :

- ▷ Les combustions de toutes sortes, en particulier le tabagisme et la cuisson d'aliments, contribuent à émettre de fortes quantités de COV dans l'air.
- ▷ Les équipements électroniques, et notamment les ordinateurs, dégagent des aldéhydes (formaldéhyde, véraldéhyde, acétaldéhyde, ...) mais aussi des hydrocarbures lourds (n-décane, n-undécane) et des composés aromatiques (toluène, xylène, styrène, ...).
- ▷ En plus de l'ozone, les photocopieurs et imprimantes peuvent émettre dans l'ambiance du 1,4-diméthylbenzène, de l'éthylbenzène, du toluène, du styrène ou des aldéhydes tels que le benzaldéhyde.
- ▷ Nombre de produits de nettoyage et de déodorants d'ambiance utilisent comme principe actif, détergent et/ou substance odorante, des composés de la famille des terpènes (α -pinène, d-limonène, ...) qui sont des constituants des huiles essentielles. Cette caractéristique peut justifier un label « bio » du produit si lesdites substances sont extraites de végétaux (résines, fruits). Cela ne doit toutefois pas occulter le fait que ces composés peuvent également être synthétisés chimiquement ... et présentent dans tous les cas une toxicité avérée !
- ▷ Enfin, les matériaux de construction et de décoration constituent toujours une des principales sources d'émission de composés organiques volatils dans l'air intérieur, comme en témoigne l'odeur caractéristique des bâtiments neufs. La nature des composés émis comme les caractéristiques d'émission varient dans de très larges proportions suivant les produits utilisés, mais quasiment tous les matériaux, y compris les matériaux d'origine naturelle (bois, laines végétales utilisées comme isolants, ...) sont le siège d'émission en COV.

Dans le cadre de la campagne « logements » de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, les concentrations de 20 composés organiques volatils ont été mesurés à l'intérieur et à l'extérieur de 567 logements jugés représentatifs de l'habitat français. Les résultats présentés en Figure 4 montrent que les concentrations intérieures sont globalement très supérieures à celles mesurées à l'extérieur, ce qui témoigne de la prédominance des émissions internes sur les apports par la ventilation et les infiltrations. Le formaldéhyde, composé le plus abondant et détecté dans 100 % des logements enquêtés, présente cette caractéristique. Il est principalement émis par les colles de type urée-formol qui entrent dans la composition d'un grand nombre de matériaux manufacturés (panneaux de bois, laines minérales, ...) ou qui sont utilisés pour la mise en œuvre des matériaux dans le bâtiment.

Figure 4 : Médiane des concentrations en COV mesurées à l'occasion de la campagne « logements » de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, d'après Arene et al. (2006).



« Les concentrations en COV sont largement, voire très largement, supérieures à l'intérieur des logements qu'à l'extérieur. »

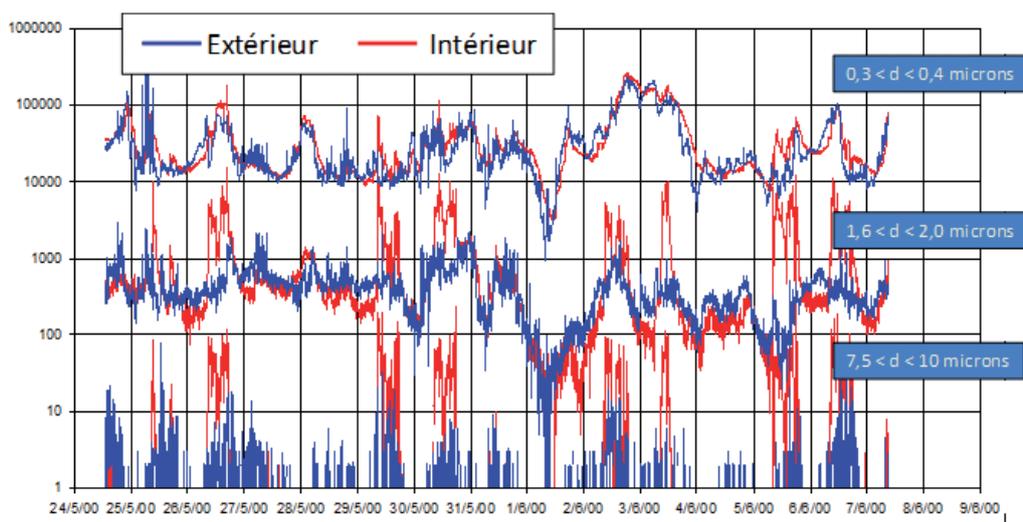
Le nombre, mais aussi la forte variabilité des concentrations dans les environnements intérieurs, rend très difficile l'appréciation de l'impact des COV sur la santé. Face à ce constat, les ingénieurs sanitaires ont raisonné pendant de nombreuses années en termes de concentrations en composés organiques totaux (COVT) pour évaluer les risques induits. Il est toutefois aujourd'hui communément admis par la communauté scientifique que ce concept ne peut être valable, tant les effets sanitaires relatifs à une exposition aiguë ou chronique peuvent être différents en nature, en intensité et en gravité suivant les espèces (irritations oculaires ou respiratoires bénignes au développement de cancers). Parmi les nombreuses maladies et autres désordres sanitaires qu'ils sont susceptibles d'occasionner ou de favoriser, les COV sont reconnus comme étant un facteur explicatif du syndrome des bâtiments malsains – SBM (Menziés et Bourbeau, 1997), une maladie collective définie par l'OMS comme « une réaction de la majorité des occupants d'un immeuble à leur environnement intérieur, réaction qui ne peut pas être directement reliée à des causes évidentes telles qu'une exposition à une concentration excessive d'un contaminant connu ou à une défectuosité d'un système de ventilation ». Ce syndrome, qui touche principalement les occupants de bâtiments tertiaires, est à l'origine de nombreux arrêts de travail. Il se caractérise par onze symptômes potentiels dont l'occurrence permet de calculer l'indice BSI (pour Building Symptom Index) du bâtiment. Le fait que cet indice soit quasi systématiquement plus élevé dans les bâtiments neufs ou rénovés, c'est-à-dire dans des environnements où les émissions par les matériaux sont importantes, tend à indiquer que les COV constituent bien un déterminant fort de la prévalence du SBM.

2. Les particules et les fibres

Les raisons à la présence de particules et de fibres dans les environnements intérieurs sont elles aussi diverses et variées. À la pénétration dans les locaux par le fait de la ventilation et des infiltrations, s'ajoutent les émissions par les combustions de toutes sortes ou par les appareils d'impression / reproduction, mais aussi les émissions de particules minérales résultant

de l'évaporation de l'eau dans les humidificateurs à vapeur, les émissions liées à l'utilisation de cosmétiques (laques, sprays), l'érosion par l'air ou l'activité humaine des matériaux de revêtements, et enfin les émissions par les occupants et leurs activités. La Figure 5, qui présente l'évolution des concentrations en particules mesurées à l'intérieur et à l'extérieur d'une école primaire de l'agglomération de La Rochelle, montre que les particules les plus fines sont les plus nombreuses dans l'air extérieur comme dans l'air intérieur. La présence de ces particules de petite taille dans l'air intérieur résulte principalement des transports par la ventilation, naturelle dans le cas étudié (ouverture des fenêtres), et les infiltrations ; elles ne sont que très peu filtrées au cours de leur passage à travers l'enveloppe. À l'inverse, les dissemblances des profils de concentrations intérieurs et extérieurs pour les particules de plus grosse taille, et notamment les pics de concentrations pendant les périodes d'occupation de la salle de classe, mettent en évidence l'importance de l'émission directe et de la remise en suspension de particules déposées par les occupants sur les niveaux de concentrations intérieures enregistrées dans ces classes granulométriques (la part de chaque phénomène étant difficile à établir).

Figure 5 : Évolution des concentrations en particules, en nombre par litre d'air et pour 3 classes granulométriques différentes, à l'intérieur et à l'extérieur d'une école de l'agglomération de La Rochelle.



« Les particules les plus petites sont plus nombreuses aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. L'activité humaine, qui remet en suspension les particules de taille moyenne et grosse, induit des pics de concentration dans l'air intérieur. »

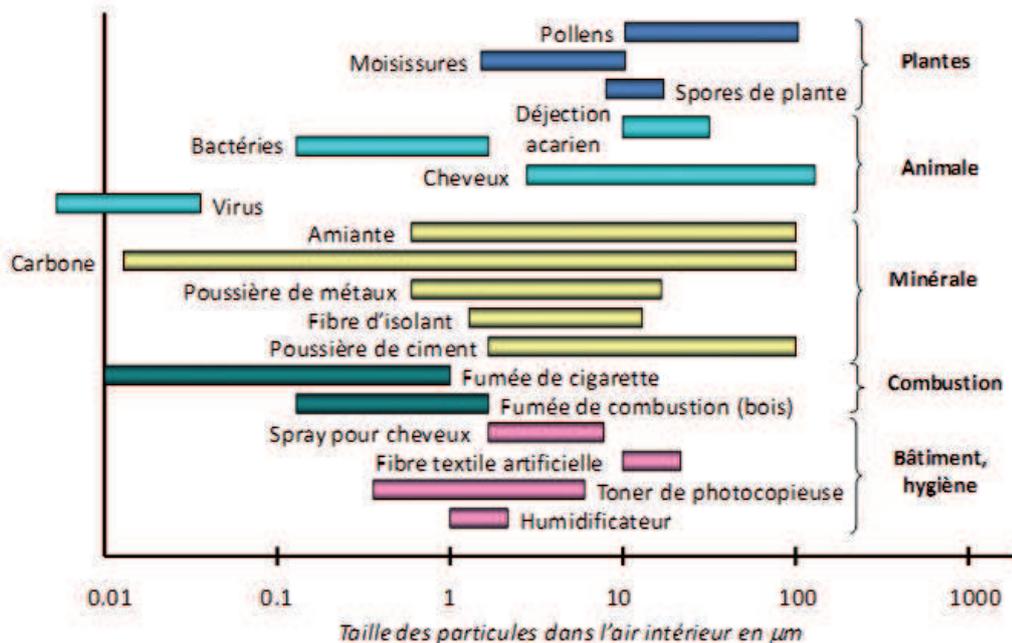
Ces considérations sur les niveaux de concentrations et les phénomènes de transport dominants des particules en fonction de leur taille sont importants dans l'optique de l'analyse d'impact sanitaire. En effet, si la capacité de l'organisme à éliminer les particules et les fibres inhalées dépend étroitement de leur origine et de leur nature chimique, la dose de particules ingérée par un individu dépend quant à elle de la concentration et de la distribution granulométrique de l'aérosol en suspension dans l'air. Ainsi, seules les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm, que l'on désigne par le terme PM10, sont d'intérêt pour l'évaluation du risque sanitaire, puisque de taille suffisamment réduite pour être inhalées. Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (PM2,5), dites particules fines, sont quant à elles suffisamment fines pour passer à travers les voies respiratoires supérieures, et atteindre ainsi les poumons. Enfin, les particules submicroniques (PM1), dites particules très fines, sont pour leur part suffisamment petites pour passer à travers les alvéoles pulmonaires, et donc pénétrer profondément à l'intérieur de l'organisme. Il en va bien sûr de même pour les nanoparticules (PM0,1), aussi appelées particules ultrafines, dont l'usage extensif dans les applications industrielles, mais aussi dans certains matériaux de construction ou de décoration, suscite énormément de questions. La Figure 6 présente la gamme de tailles de particules émises dans

l'air en fonction de leur origine. On peut y noter que les micro-organismes, bactéries et surtout virus, sont des particules de très petite taille, qui comme on le sait peuvent donc investir tout le corps suite à une exposition par inhalation. On peut également relever que la nocivité de la fumée de cigarette tient autant à la granulométrie des particules émises (PM1) qu'à leur nombre.

Outre le facteur taille, le risque sanitaire lié à l'exposition aux particules en suspension dans l'air dépend de la composition chimique de ces particules – métaux, sulfates, nitrates, ammonium, chlorure de sodium, carbone, matières minérales, ... – qui détermine leur capacité d'élimination par l'organisme.

Les principaux troubles et maladies associés à l'exposition aux particules sont l'altération des fonctions pulmonaires, l'obstruction pulmonaire chronique, les maladies et accidents cardiovasculaires, ainsi que le cancer du poumon. Dans le cas spécifique des fibres, les projecteurs ont pendant longtemps été braqués sur l'amiante, suite au scandale occasionné par la révélation des nombreux cas de fibrose pulmonaire, et de cancers du poumon et de la plèvre chez des individus directement exposés à ce matériau. Il subsiste en revanche toujours beaucoup d'inconnues quant aux possibles effets sanitaires d'autres matériaux fibreux utilisés dans la construction (laine de verre, de roche ou de laitier). Le principe de précaution s'est pour l'heure essentiellement traduit par un renforcement dans le code du travail des mesures de protection des artisans et des ouvriers du bâtiment qui installent ces matériaux, et qui sont par conséquent exposés de manière chronique à ce type de fibres.

Figure 6 : Gamme de taille des particules en suspension dans l'air intérieur en fonction de leur origine, d'après Owen *et al.* (1990).



« Il existe une très grande variabilité de la taille des particules de l'air intérieur. La nocivité de la fumée de cigarette provient aussi bien de la quantité de particules générées que de leur taille. »

3. Les composés organiques semi-volatils

Les composés organiques semi-volatils (COSV) détectés dans les logements et les autres lieux de vie sont de différentes natures et proviennent de nombreuses sources :

- ▷ Les pesticides, qui font régulièrement l'actualité par la pollution induite de l'eau et des aliments, ont également de nombreux usages dans les bâtiments : traitements antiparasitaires des animaux domestiques, insecticides ménagers diffusés dans l'air sous forme d'aérosols ou à partir de diffuseurs électriques, et produits ménagers antibactériens



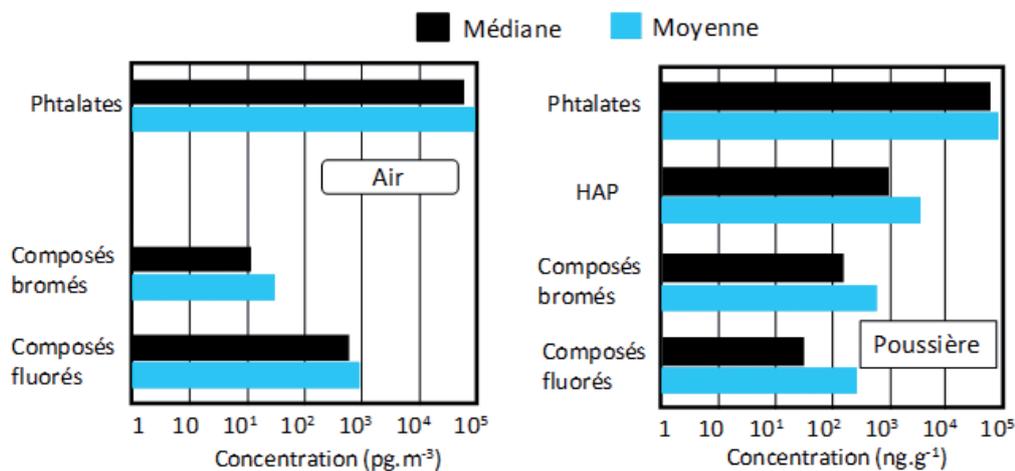
ou anti-moisissures. Les matériaux du bâtiment peuvent également constituer un vecteur de contamination des ambiances intérieures par les pesticides du fait du prétraitement antiparasitaire dont ils font l'objet avant commercialisation (bois, isolants d'origine végétale et animale), ou par les traitements périodiques effectués après la construction (boiseries, charpentes, ...).

- ▷ Les phtalates sont des produits dérivés du pétrole qui possèdent la faculté d'assouplir les polymères. Ils entrent ainsi dans la composition de nombreux produits de consommation et matériaux plastiques utilisés dans les bâtiments (rideau de douche, jouets, mobilier, dalles de sol ...).
- ▷ Les phényl-éther polybromés (PEPB) sont utilisés comme retardateurs de flamme pour traiter les mousses, les tissus et les composants électroniques destinés à intégrer les bâtiments. Ils sont donc émis dans l'air intérieur par le mobilier (canapés, rideaux, ...) et les équipements électroménagers présents dans les logements.
- ▷ Les polychlorobiphényles (PCB) rejetés dans l'atmosphère par les effluents industriels sont connus pour être des polluants du lit des fleuves et des rivières, qui contaminent par suite la chaîne alimentaire. Ces composés entrent également dans la composition de colles et de produits d'étanchéité utilisés dans la construction. Ils peuvent donc être émis dans l'air intérieur.
- ▷ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont émis dans les ambiances intérieures par les combustions internes de toutes sortes : tabagisme, encens, gaz d'échappement des voitures dans le cas où le garage est attenant à la maison. Les autres sources potentielles sont la cuisson d'aliments et les produits antimites (boules de naphtaline).

La difficulté à appréhender l'impact sanitaire des COSV tient en grande partie à leur température d'ébullition, supérieure à 250°C, qui leur confère à la fois des caractéristiques d'émission très lentes et une forte capacité d'adsorption sur les particules en suspension dans l'air et les matériaux qui délimitent l'ambiance. Pratiquement, cela a pour conséquence que le temps de résidence des COSV dans les bâtiments couvre des échelles de temps très longues, mais que leurs concentrations dans l'air comme dans la poussière (Figure 7) sont si faibles qu'elles ne peuvent être mesurées sans recourir à des moyens analytiques lourds et coûteux. Outre le problème métrologique, l'évaluation du risque sanitaire lié à la présence de COSV dans l'air intérieur est rendue très complexe par le fait que l'inhalation n'est pas nécessairement la seule voie d'exposition pour les occupants. Il convient en premier lieu de relever que l'eau et les aliments sont aussi susceptibles d'être pollués par les pesticides et un certain nombre d'autres COSV, ce qui cible de facto l'ingestion par la bouche comme une voie d'exposition privilégiée. Dans le cas des cosmétiques, qui peuvent eux aussi intégrer des COSV dans leur composition (parabènes notamment), c'est bien sûr l'absorption directe par la peau qui semble être la principale voie d'exposition. Enfin, pour les COSV émis dans l'air, l'exposition peut se faire par inhalation de molécules gazeuses ou de particules en suspension dans l'air, par voie cutanée (absorption par la peau des molécules et des particules ultrafines), ou, dans les cas des enfants en bas âge, par ingestion de poussières contaminées et déposées au sol, sans que la contribution de chacune de ces voies d'exposition ne puisse être évaluée précisément en l'état des connaissances actuelles (Figure 8).

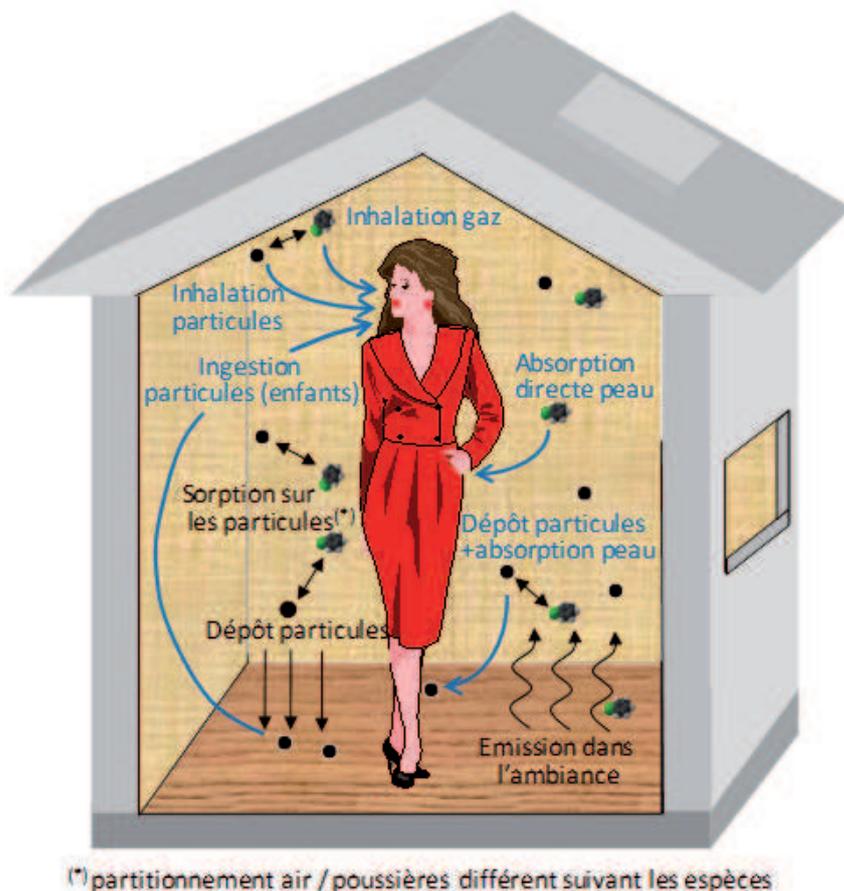


Figure 7 : Concentrations en composés organiques semi volatils mesurés dans l'air et dans la poussière d'un échantillon représentatif de logements à Ottawa, d'après Zhu *et al.* (2007).



« Les COSV sont présents dans l'air intérieur et dans les poussières en faible quantité mais peuvent persister pendant de longues périodes. »

Figure 8 : Illustration des transformations physico-chimiques contribuant à l'émission de COSV dans l'air intérieur et des différentes voies d'exposition à ces polluants.



« Les COSV émis dans l'air intérieur peuvent pénétrer à l'intérieur de l'organisme par la respiration, par ingestion de particules ou par absorption à travers la peau. »



En dépit de la complexité du problème, le danger lié à l'exposition aux pesticides ne fait plus aujourd'hui aucun doute. Au cours des quinze dernières années, plusieurs substances ont été classées cancérigène avéré, probable ou possible chez l'homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), et par suite interdits d'usage dans les produits de consommation et du bâtiment. C'est notamment le cas du chlorpyrifos, acaricide longtemps utilisé pour traiter les literies des enfants allergiques, mais interdit dans le secteur résidentiel en France en 2004, ou du lindane, fongicide utilisé pour le traitement des bois, interdit depuis 1998... mais dont les concentrations dans certains logements restent encore élevées à ce jour.

D'une manière générale, les COSV sont considérés comme étant des perturbateurs endocriniens. Le système endocrinien est composé de plusieurs organes (pancréas, surrénales, testicules, ovaires, thyroïde, ...) qui sécrètent des hormones diffusées dans le sang. Il coordonne les organes et les tissus pour assurer le fonctionnement correct de l'organisme. Par extension, on appelle perturbateur endocrinien toute substance ou mélange exogène qui altère les fonctions du système endocrinien, induisant des effets nocifs sur la santé d'un organisme intact, de ses descendants ou sous-populations (définition officielle par l'UE, 1996). Les perturbations occasionnées par l'exposition aux COSV peuvent en l'occurrence concerner différentes fonctions (Voir Duval et Simonot, 2010) :

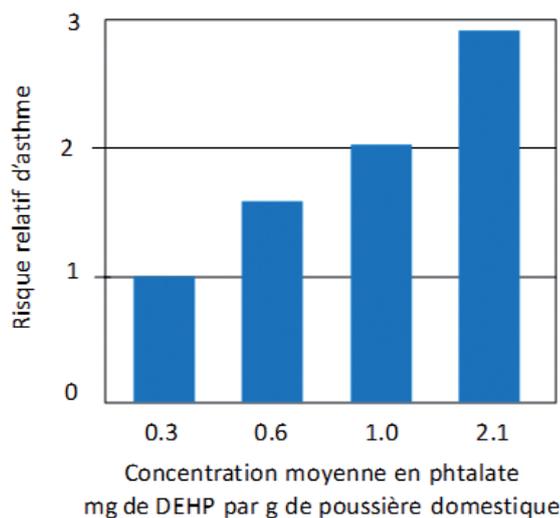
▷ **Perturbations du système reproducteur**

Les pesticides sont particulièrement incriminés mais les phtalates, les phénols et les parabènes sont aussi suspectés. Les scientifiques ont par exemple relevé une baisse particulièrement inquiétante de la fertilité masculine avec un déclin de la spermatogénèse observé et évalué à 50 % en 50 ans. Les cas de puberté précoce chez les filles sont également de plus en plus courant : l'âge de référence était de 10 ans et 5 mois en 1970 contre 9 ans et 7 mois en 1998.

▷ **Perturbations du système respiratoire**

L'exposition massive ou chronique à des pesticides tels que le lindane a été reconnue comme étant la principale cause de cas de sensibilité chimique multiple, qui est une forme d'hyper-allergie. L'exposition aux COSV, et en particulier aux phtalates, constitue aussi et surtout un facteur explicatif à la recrudescence de l'allergie et de l'asthme dans tous les pays européens. Des études scientifiques montrent par exemple que le risque d'asthme chez les enfants est approximativement multiplié par 3 quand la concentration en phtalates dans le logement est multipliée par 7 (Figure 9).

Figure 9 : Augmentation du risque d'asthme chez les enfants en fonction de la quantité de di(2ethylhexyl) phtalate dans la poussière des logements, d'après Bornehag *et al.* (2004).



« Le risque d'asthme chez l'enfant est approximativement triplé lorsque l'exposition aux phtalates est multiplié par 7. »



▷ **Système nerveux central et développement**

Des études scientifiques montrent que :

- Chez les agriculteurs, l'exposition aux pesticides double le risque de survenue de la maladie de Parkinson ;
- Il existe une augmentation du risque de handicap mental lié à l'exposition de la mère aux PEPB et aux PCB ;
- Il y a augmentation de l'agressivité, et diminution de l'activité motrice, de la mémoire, et de l'attention chez les enfants exposés au bisphénol A.

▷ **Système métabolique et cardiovasculaire**

Comme l'asthme et l'allergie, le diabète de type I est en augmentation en France comme en Europe depuis 20 ans (augmentation moyenne de 3,9 % par an). Sans cibler explicitement les COSV, l'hypothèse environnementale est retenue comme explication (étude TEDDY). Pour l'obésité, le diabète de type II, les maladies cardiovasculaires, les AVC, les perturbateurs endocriniens sont identifiés comme faisant partie des multiples facteurs qui expliquent là aussi la forte recrudescence de cas déclarés.

4. Les bio-contaminants

■ 4.1. Les virus et les bactéries

Les virus et les bactéries sont portés par les êtres humains ou les animaux domestiques. Leur transmission d'un individu à l'autre s'effectue essentiellement par contact direct ou par l'émission dans l'air de fines particules liquides contaminées (toux, éternuement, parole). Le seul véritable cas où le bâtiment lui-même ou ses équipements peuvent être incriminés concerne le cas des légionelles, mais il s'agit en l'occurrence davantage d'un problème de qualité de l'eau que de qualité de l'air. Après avoir été introduits dans une ambiance intérieure, les virus et les bactéries sont dispersés dans l'air suivant les processus physiques décrits dans le chapitre III (transports par les flux d'air, dépôt sur les matériaux, remise en suspension). De manière un peu surprenante, il subsiste encore beaucoup d'inconnues sur l'espérance de vie de ces espèces hors de leur support aqueux, comme sur leur propension à se reproduire, ou au contraire à être détruites, au contact des matériaux. Sur la base de connaissances issues de la biologie, différents auteurs ont pointé l'importance de facteurs tels que le pouvoir hygroscopique, le pH, ou la teneur en éléments nutritifs (carbone, hydrogène, azote, soufre, phosphore, potassium, fer, calcium, magnésium) du support, sans pour autant qu'il n'existe beaucoup de données chiffrées sur la viabilité des espèces déposées sur des matériaux du bâtiment clairement identifiés.

■ 4.2. Les allergènes

Les aéro-allergènes rencontrés dans les environnements intérieurs ont des origines diverses et présentent des caractéristiques physiques très différentes :

- ▷ Les pollens sont de grosses particules (Figure 6) qui sont naturellement filtrées par l'enveloppe et le système de ventilation du bâtiment, soit par la mise en place d'un filtre à particules, soit tout simplement par dépôt à la surface des gaines et des autres composants de l'installation. En ce sens, le confinement à l'intérieur des bâtiments constitue un moyen de protection efficace des personnes allergiques et asthmatiques en période pollinique de pointe.
- ▷ Les déjections d'acariens sont elles aussi de relativement grosses particules - leur diamètre aérodynamique varie entre 10 et 40 μm - qui se déposent rapidement au sol ou sur le mobilier par l'effet de la gravité. En ce sens, la (re)mise en suspension par l'activité humaine joue un rôle clé dans la contamination des occupants. Les acariens se nourrissant essentiellement de protéines contenues dans la poussière et de débris humains ou animaux (squames, poils, cheveux), les plus fortes concentrations en allergènes d'acariens (Der p1 et Der f1) sont logiquement mesurées dans les literies et les matériaux ou éléments de mobilier retenant la poussière : tapis, moquette, peluches, etc...

- 
- ▷ Parmi toutes les allergies aux animaux domestiques (chien, chat, cheval, hamster, ...), l'allergie au chat est sans aucun doute la plus problématique en termes de santé publique. Outre le fait que les chats sont les animaux de compagnie les plus nombreux (8 millions en France), l'allergène de chat présente en effet des caractéristiques très favorables à sa dissémination dans l'environnement. Contrairement aux idées reçues, l'allergène n'est pas le poil de chat lui-même, mais une protéine (Fel d1) contenue dans la salive. Cet allergène est porté par des particules de taille inférieure à 2,5 µm, qui demeurent longtemps en suspension dans l'air et peuvent par conséquent être aéroportées vers d'autres ambiances au gré des mouvements d'air. Comme par ailleurs ces particules sont électrostatiques, elles se fixent aisément sur les vêtements, participant de cette manière au processus de contamination de locaux où il n'y a pas de chat. Les études montrent que la concentration en allergène Fel d1 est plus importante dans les habitations où il y a un chat, mais l'allergie est également fréquemment retrouvée dans les habitations ou les autres lieux de vie où il n'y en a pas (écoles par exemple). Les allergènes du chat sont l'une des causes les plus fréquentes d'allergie respiratoire dans le monde. La sensibilisation au chat est fortement associée à l'asthme, ce qui signifie que les enfants sensibilisés au chat sont plus enclins à développer un asthme sévère que les enfants présentant des tests négatifs à cet animal.

■ 4.3. Les moisissures

Les moisissures sont des champignons microscopiques qui pénètrent dans les bâtiments par les ouvertures (portes, fenêtres, ventilation) ou en étant portés par les occupants (vêtements, peau, cheveux). Elles ne deviennent visibles qu'en germant et en proliférant à la surface des matériaux. Pour cela, trois conditions doivent être réunies : un niveau de température suffisant, un niveau d'humidité suffisant et un support nutritif adapté. Partant du principe que la première condition est systématiquement vérifiée pour des bâtiments chauffés en hiver, les moisissures se développent préférentiellement sur les matériaux présentant d'une part une humidité importante du fait de fuites d'eau, de remontées d'eau, de condensations ou de l'abondance de poussières (les poussières domestiques constituent une substance très hygroscopique), et d'autre part un contenu en matière organique pouvant servir de nutriments : cellulose du bois, du papier ou du carton, matériaux contenant de l'amidon, matériaux et éléments de mobilier fortement empoussiérés, ...

La contamination par les moisissures peut s'effectuer par la respiration ou par contact direct avec la peau ou les muqueuses (nez, bouche, oreille). Elle peut se manifester par des symptômes bénins ou plus graves suivant le niveau d'exposition et la sensibilité des individus exposés (HQE, 2002) :

- ▷ La présence de moisissures dans les bâtiments tertiaires a été identifiée comme un déterminant du syndrome des bâtiments malsains.
- ▷ Les moisissures sont également associées à l'asthme et à la rhinite allergique ; elles peuvent être à l'origine de la sensibilisation ou aggraver une maladie allergique déjà installée.
- ▷ Les infections des voies respiratoires, des yeux ou de la peau qui sont directement dues aux moisissures du bâtiment, comme les cas d'intoxication dus aux toxines sécrétées par les moisissures, demeurent très rares ; elles concernent surtout les personnes à risque ou fragilisées.

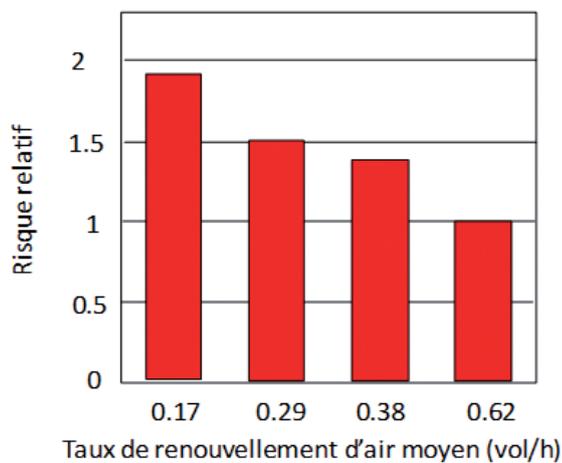
■ 4.4. L'influence de l'humidité

Aucune revue de la pollution microbienne de l'air intérieur ne saurait être complète sans mentionner le rôle central qu'y tient l'humidité. La vapeur d'eau en elle-même ne présente évidemment aucune toxicité. Néanmoins, l'humidité de l'air a un impact majeur sur la santé à travers ses effets directs sur le bon fonctionnement de l'arbre respiratoire, et ses effets indirects sur le développement des micro-organismes dans les environnements intérieurs. Le rôle prédominant de l'humidité dans le développement des moisissures vient ainsi d'être évoqué. L'humidité constitue également un facteur clé du développement des acariens, dont l'espérance de vie est de 3 mois si l'humidité ambiante est comprise entre 55 % et 85 %, mais seulement de 4 à 11 jours si celle-ci est inférieure à 50 %. Finalement, comme l'ont démontré Bornehag et al.



(2005), le risque allergique et asthmatique est intimement corrélé au taux de renouvellement d'air des bâtiments, qui détermine le niveau d'humidité. Ce risque est quasiment doublé lorsque le taux de renouvellement d'air des logements passe de 0,62 vol/h, ce qui correspond à un niveau de ventilation correct, à 0,17 vol/h, correspondant à une faible ventilation des locaux (Figure 10).

Figure 10 : Probabilité pour un enfant de ressentir au moins 2 des 3 symptômes suivants : eczéma, rhinite, respiration sifflante, en fonction du taux de renouvellement d'air moyen du logement, d'après *Bornehag et al.* (2005).



« Une augmentation du débit de ventilation, qui induit une diminution de l'humidité relative de l'air, réduit le risque d'eczéma, de rhinite et d'asthme chez l'enfant. »

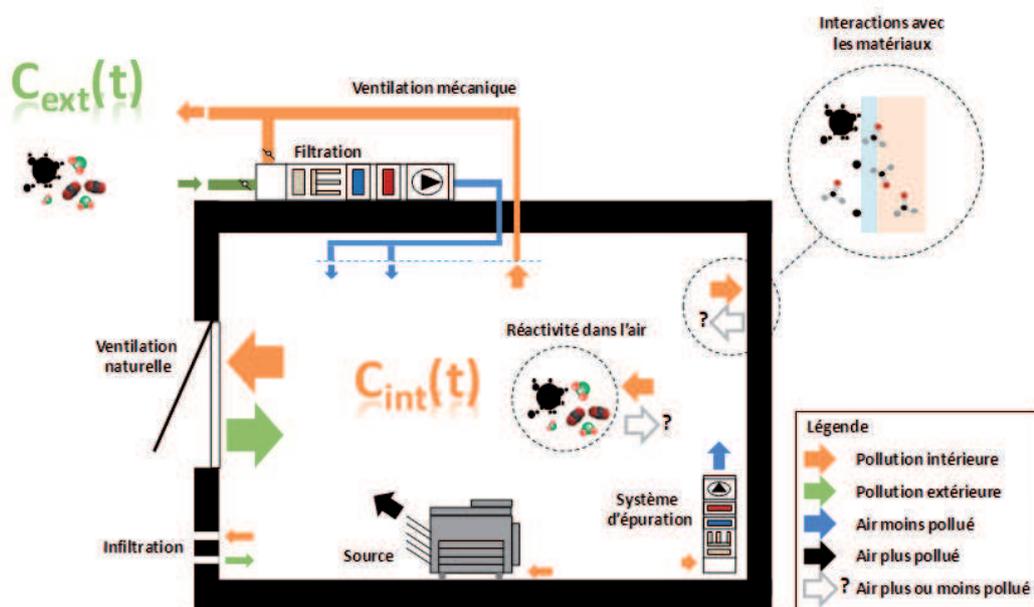
Chapitre 3

L'évolution temporelle des polluants

1. L'émission et l'élimination des polluants

L'évaluation de l'évolution temporelle de la concentration des polluants à l'intérieur d'une ambiance interne d'un bâtiment s'effectue par l'application de la conservation massique de polluant à l'intérieur du volume d'air étudié (Figure 1).

Figure 1 : Représentation schématique de la dynamique des polluants à l'intérieur d'un bâtiment.



« La concentration en polluant de l'air intérieur dépend des échanges avec l'extérieur (par infiltration, ventilation naturelle et ventilation mécanique ; avec ou sans filtration), de l'émission des sources intérieures, de la présence de systèmes d'épuration, des transformations des polluants dans l'air (réactivité) et des interactions avec les matériaux. »

Ce principe fondamental, décrit par l'équation suivante, traduit tout simplement le fait que la concentration en polluant varie dans le temps en fonction de l'importance relative des termes sources et puits :

$$V \frac{dC_{int}(t)}{dt} = J_{source}(t) + J_{transport\ par\ l'air}(t) + J_{interactions\ avec\ les\ matériaux}(t) + J_{réactivité\ dans\ l'air}(t) + J_{système\ d'épuration}(t)$$

Où $C_{int}(t)$ est la concentration en polluant dans l'air intérieur ($\mu g/m^3$), V est le volume de l'ambiance (m^3), t est le temps (s), $J_{source}(t)$ est le taux d'émission du polluant ($\mu g/s$), $J_{transport\ par\ l'air}(t)$ est le flux massique net de polluant dû à l'écoulement d'air ($\mu g/s$), $J_{interaction\ des\ matériaux}(t)$ est le flux massique net de polluant induit par les interactions avec les matériaux ($\mu g/s$), $J_{réactif\ dans\ l'air}(t)$ est le flux massique net de polluant traduisant les réactions entre polluants ($\mu g/s$) et $J_{système\ d'épuration}(t)$ est le flux massique net de polluant dû au système d'épuration interne à l'ambiance ($\mu g/s$).

Les termes sources rassemblent le transport de polluants par l'air entrant dans l'ambiance par ventilation mécanique ou naturelle et par infiltration et l'émission par des sources intérieures. Les puits regroupent le transport de polluants par l'air extrait de l'ambiance et l'élimination par



les épurateurs présents dans le local. Deux autres phénomènes agissent en tant que sources ou puits selon les cas : les réactions entre polluants et leurs interactions avec les matériaux. L'ensemble de ces paramètres doit être pris en compte pour évaluer l'évolution temporelle des concentrations en polluants. L'importance relative de ceux-ci dépend à la fois du bâtiment, de ses matériaux de construction, de son système de ventilation (débit et typologie), du type de sources de polluants, de son fonctionnement (occupation des usagers, maintenance et nettoyage des systèmes et des locaux) mais également du type de polluants. Ainsi, pour le polluant particulaire, la taille des particules est un paramètre déterminant qui conditionne les risques et les moyens de traitement. Pour les polluants gazeux, c'est le type des molécules en présence qui modifie l'équilibre des différents processus décrits plus haut. On notera que pour ces polluants, les conditions hygrothermiques et de rayonnement solaire peuvent jouer également un rôle important.

■ 1.1. Les sources

Les taux d'émission des sources intérieures de polluants sont très variables en fonction du type de sources et de polluants considérés. Récemment, Abadie et Blondeau (2011) ont créé une base de données regroupant les données de la littérature concernant les taux d'émission des polluants gazeux et particulaires générés par les sources rencontrées à l'intérieur des bâtiments. Cette base de données, nommée PANDORE (une compIlAtion des émissioNs Des pOlluants de l'aiR intériEur), compile de nombreuses données tirées d'articles scientifiques de premier ordre ainsi que de base de données existantes comme MEDB-IAQ (a Material Emission DataBase and Single-Zone Indoor Air Quality Simulation Program ; Zhang et al., 1999), la base de données de l'U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA, 1999), SOPHIE (a database of SOurces of Pollution for a Healthy and comfortable Indoor Environment ; Bluysen et al., 2000) et BUMA (prioritization of BUilding MAterials as indoor pollution sources ; Bartzis et al., 2009). Un total d'environ 500 sources de polluants représentant près de 7000 émissions de polluants a été intégré à la base PANDORE. Ces sources de polluants se répartissent essentiellement selon les matériaux (60 %), les activités des occupants (34 %) et, dans une bien moins grande quantité, selon les produits d'entretien du bâtiment (6 %). On remarquera que, malgré l'importance de telles données pour l'évaluation de l'exposition des occupants aux polluants, les taux d'émission des sources s'étendent sur de larges intervalles (voir la première illustration du chapitre suivant).

■ 1.2. Le transport par l'air

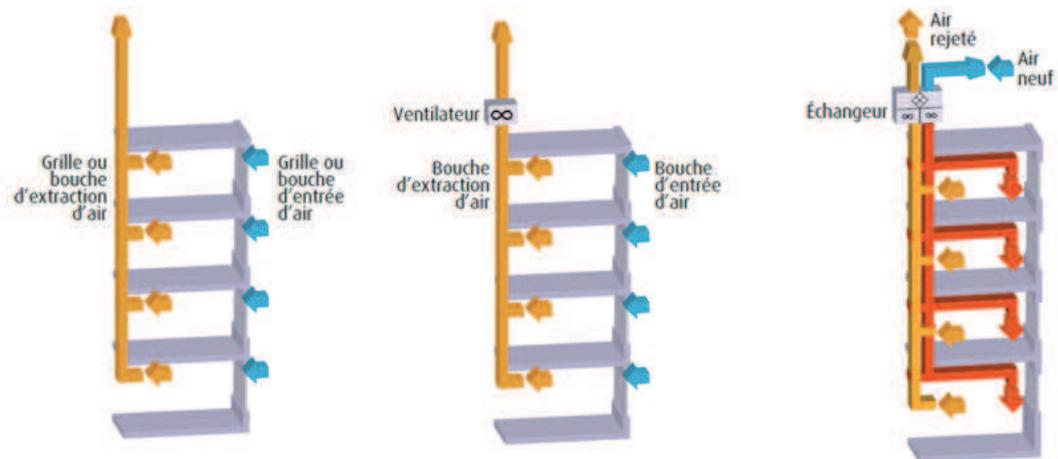
Le transport des polluants par l'air contribue d'une part à extraire les polluants intérieurs vers l'extérieur du bâtiment et d'autre part à apporter de l'air plus ou moins pollué de l'extérieur. On distingue généralement les infiltrations qui sont des passages d'air à travers l'enveloppe du bâtiment non maîtrisés (liaisons entre les dalles et les murs, entre les parois et les huisseries, au niveau des percements effectués pour le passage de canalisations, de conduits ou de câbles électriques), la ventilation naturelle qui s'effectue à travers des ouvertures destinées à permettre l'écoulement d'air grâce aux seules forces du vent et du tirage thermique, la ventilation mécanique dont les débits d'air sont assurés par un ventilateur et dont l'écoulement d'air a lieu à travers un réseau de conduits et la ventilation hybride ou ventilation naturelle assistée dont le but est de maximiser l'utilisation de la ventilation naturelle tout en ayant recours à un ventilateur afin d'assurer des débits requis lorsque la part naturelle n'est plus suffisante.

La [Figure 2](#) illustre les principes de la ventilation naturelle et deux typologies de ventilation mécanique contrôlée (VMC). Les solutions de ventilation pour les logements sont : la VMC simple flux autoréglable par extraction, la VMC simple flux hygro-réglable par extraction avec bouches d'extraction hygro-réglables et entrées d'air autoréglables (type A) ou avec bouches d'extraction et entrées d'air hygro-réglables (type B) et la VMC double flux qui présente une insufflation et une extraction d'air par ventilateurs avec éventuellement un préchauffage et/ou un rafraîchissement de l'air neuf. Par VMC autoréglable, on entend que les bouches d'entrée d'air sont munies d'un système, un simple volet qui se ferme en fonction de la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, qui contrôle les débits entrant dans l'ambiance. Pour la VMC hygro-réglable, c'est l'humidité relative de l'air intérieur qui est la variable de contrôle, augmentant le



passage d'air et donc le débit lorsqu'il y a génération de vapeur d'eau dans l'ambiance. Dans le tertiaire, on retrouve en plus de ces trois systèmes, les installations de conditionnement d'air qui ont la fonction de renouvellement d'air, généralement en double flux, associée aux fonctions de chauffage et/ou de rafraîchissement de l'air et de l'humidification et/ou de la déshumidification de l'air. Les systèmes mécaniques à double flux permettent de plus de filtrer l'air extérieur avant son injection à l'intérieur du bâtiment.

Figure 2 : Principe de la ventilation naturelle (à gauche), de la VMC simple flux (au centre) et de la VMC double flux (à droite) – source Guide « Construire sain » (2011).

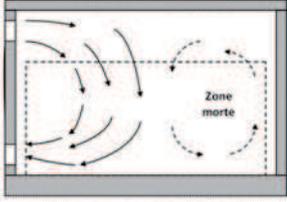
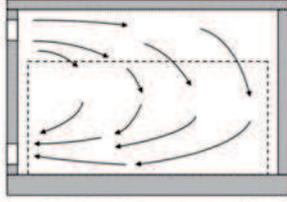
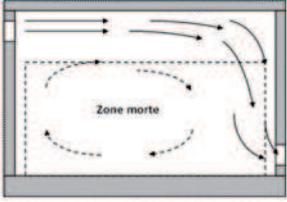
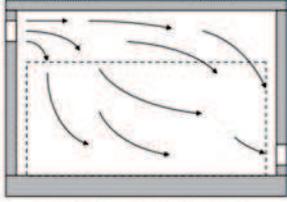
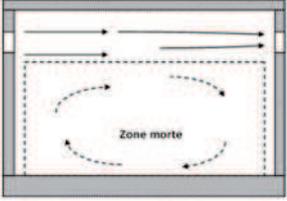
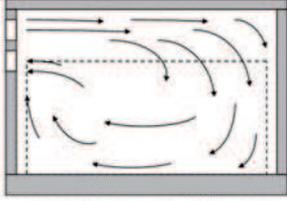
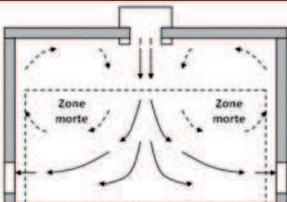
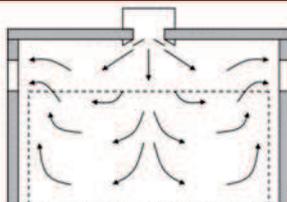
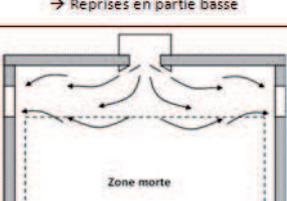
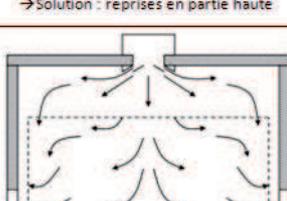
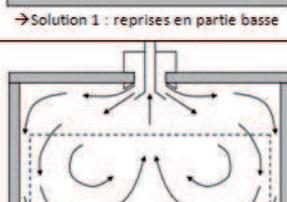


« La ventilation naturelle et la VMC simple flux par extraction sont des moyens simples de ventiler les ambiances lorsque la pollution extérieure est faible. Dans le cas contraire, l'air doit être filtré et le recours à l'insufflation est nécessaire ; la VMC double flux permet en plus de récupérer une partie de l'énergie grâce à un échangeur de chaleur placé entre l'air neuf et l'air rejeté. »

L'air pollué extérieur pénètre donc à l'intérieur des bâtiments par infiltration, ventilation naturelle et/ou ventilation mécanique. Si pour la ventilation mécanique l'évaluation du débit de renouvellement d'air est évidente, il n'en est pas de même pour les deux premiers transferts car le taux de renouvellement d'air dépend des conditions climatiques telles que la différence de température entre l'air intérieur et extérieur, la vitesse du vent... Ainsi chaque bâtiment est un cas particulier et la part de la pollution extérieure sur la concentration intérieure s'étend de zéro pour un bâtiment dont l'enveloppe est très imperméable et muni d'un système de ventilation mécanique avec filtration élevée ou en présence de sources internes à très haute émission de polluants, à 100 % dans un bâtiment fortement ventilée, sans filtration et sans sources internes importantes.

Du point de vue de l'extraction des polluants accumulés à l'intérieur des ambiances, un dernier paramètre essentiel, en plus de la typologie et des débits à apporter à l'ambiance intérieure (voir les débits minimaux à respecter dans le chapitre dédié à la réglementation), à une ventilation de qualité est son efficacité en terme de diffusion de l'air à l'ensemble des ambiances internes. Ainsi, au niveau d'un ensemble de zones, le principe de ventilation générale doit être appliqué. Par exemple, dans le cas d'un logement, les pièces principales doivent comporter des entrées d'air et l'évacuation de l'air doit se faire dans les pièces de service (cuisine, salles d'eau, toilettes). L'efficacité de la ventilation doit être également contrôlée au niveau d'une ambiance afin de maximiser la dilution des polluants et éviter la création de zones de recirculation d'air et de court-circuit. L'efficacité de la ventilation, c'est-à-dire la capacité du système de ventilation à balayer l'ensemble de l'ambiance, dépend fortement de l'emplacement des bouches d'entrée et de sortie d'air qui est à déterminer en fonction de la géométrie de l'ambiance et des conditions en températures qui influent également sur la portée des jets. La Figure 3 présente quelques exemples de bonnes et mauvaises pratiques concernant la diffusion de l'air à l'intérieur d'une ambiance.

Figure 3 : Exemples de bonnes et de mauvaises diffusions de l'air à l'intérieur d'une ambiance.

| | | Système non efficace | Système efficace |
|------------------------|-------------------------------|---|--|
| Diffuseurs muraux | Soufflage avec vitesse faible |  <p>→ Reprise du même côté</p> |  <p>→ Solution : vitesse plus élevée</p> |
| | Soufflage avec vitesse élevée |  <p>→ Reprise en partie haute opposée</p> |  <p>→ Solution : vitesse plus faible</p> |
| | Soufflage avec vitesse élevée |  <p>→ Reprise en partie haute opposée</p> |  <p>→ Solution : reprise du même côté</p> |
| Diffuseurs plafonniers | Soufflage presque vertical |  <p>→ Reprises en partie basse</p> |  <p>→ Solution : reprises en partie haute</p> |
| | Soufflage sous angle moyen |  <p>→ Reprises en partie haute</p> |  <p>→ Solution 1 : reprises en partie basse</p>  <p>→ Solution 2 : reprise au centre de la bouche</p> |

« En fonction du type de bouches de soufflage, il est important de positionner correctement les bouches de sortie d'air afin de faire circuler l'air neuf dans toute l'ambiance et augmenter ainsi l'efficacité d'extraction du polluant. »



■ 1.3. Les interactions avec les matériaux

Les polluants particulaires et gazeux n'interagissent pas de manière identique avec les matériaux puisque, pour les premiers, les interactions sont limitées à la surface des matériaux alors que les seconds vont pénétrer à l'intérieur des matériaux pour interagir avec ceux-ci.

Plusieurs mécanismes contribuent au dépôt particulaire. Dans les environnements intérieurs, la vitesse de l'écoulement d'air et sa turbulence sont généralement suffisamment fortes pour que les particules soient rapidement transportées vers les matériaux de l'ambiance (parois, mobilier...). Le transport à travers la couche limite, d'épaisseur inférieure à 1 cm, en bordure de la surface des matériaux contrôle le dépôt. Pour les particules ultrafines (de diamètre inférieur à $0,1\mu\text{m}$), la diffusion Brownienne, qui est induite par les actions incessantes des molécules de gaz contre les particules, est prépondérante alors que la gravité et l'inertie pour les particules grossières (de diamètre supérieur à $2,5\mu\text{m}$) conditionnent leur dépôt. Les particules fines, de tailles intermédiaires, sont quant à elles moins sujettes au dépôt. Représentée en fonction de la taille des particules, l'intensité du dépôt sur la surface d'un matériau comme une paroi, un revêtement plus ou moins rugueux, un mobilier mais également à l'intérieur d'un filtre à fibre ou à travers une fissure forme ainsi une courbe en « V » (voir le graphe de droite de la [Figure 15](#)). La remise en suspension de particules déposées peut être également un mécanisme important. On peut distinguer deux types de remise en suspension : celle induite par l'écoulement d'air existant dans le volume d'étude, et celle engendrée par l'activité des personnes présentes dans la zone. Le premier type peut devenir important dans les réseaux de ventilation où les vitesses d'écoulement d'air sont suffisamment importantes pour arracher des particules déposées et peut induire une source de pollution à la remise en marche de la ventilation par exemple. L'activité des occupants, en particulier le simple fait de se déplacer, remet dans l'air respirable des particules déposées par contact direct et arrachage entre la semelle des chaussures et le sol. On notera que si le phénomène de dépôt est assez bien connu et quantifiable, la remise en suspension reste toujours, quant à elle, un paramètre difficile à évaluer.

Si seule la diffusion à travers la couche limite qui sépare l'ambiance de la surface solide était importante pour les particules, pour les polluants gazeux, trois phénomènes s'ajoutent à celle-ci : la diffusion dans le solide qui, si l'élément est poreux, revêt plusieurs formes, les phénomènes d'adsorption/désorption à la surface ou au sein même des matériaux (la sorption peut également prendre place aux frontières du réseau poreux) et éventuellement les réactions chimiques de surface si l'on considère que les polluants gazeux peuvent se transformer au contact du matériau (Allard et al., 2002).

La diffusion à travers la couche limite est comme pour les particules intimement liée aux caractéristiques de l'écoulement au voisinage de la surface. La principale différence est qu'elle peut être traitée ici par analogie avec les transferts thermiques et qu'elle est donc plus facile à quantifier que pour le polluant particulaire. Cependant, l'interaction même du polluant gazeux avec les matériaux est bien plus complexe.

On peut définir l'adsorption comme la séparation d'une substance d'une phase, ici le polluant gazeux de l'air, et l'accumulation de cette substance sur les surfaces d'une autre phase (les sites actifs solides des matériaux de construction). La désorption est le phénomène inverse. Il faut bien distinguer le phénomène d'adsorption du phénomène d'absorption ; le premier se rapporte à la surface d'un solide (ou d'un liquide) alors que le second se rapporte à son volume. On distingue l'adsorption physique qui est réversible et l'adsorption chimique non réversible. La réversibilité vient des liaisons relativement faibles (électrostatique) entre les molécules adsorbées et le matériau qui existent dans l'adsorption physique. L'adsorption chimique induit, quant à elle, des liaisons beaucoup plus fortes et une destruction de l'identité de la molécule adsorbée. L'adsorption d'un polluant gazeux s'opère en plusieurs phases. Dans un premier temps, la surface du matériau offre un certain nombre de sites actifs pour l'adsorption. Pour l'adsorption



physique, les molécules gazeuses se positionnent sur la surface par le jeu d'un équilibre entre les forces d'attraction exercées par le matériau et les forces de répulsion exercées par les molécules préalablement adsorbées. Dans le cas de l'adsorption chimique, les molécules gazeuses qui parviennent à proximité de la surface se fixent préférentiellement sur les sites qui tendent à maximiser leur nombre de coordination. Cette première phase termine lorsque la surface du matériau ne propose plus de sites de fixation. Dans un deuxième temps, la couche de molécules adsorbées peut servir de support à une adsorption du gaz qui est alors nécessairement physique. Chacune des couches ainsi formées possédant la faculté de fixer de nouvelles molécules gazeuses, ce phénomène est qualifié d'adsorption multicouche. Enfin, si la pression partielle du polluant dans l'air devient supérieure à sa pression de vapeur saturante, le phénomène de condensation peut avoir lieu. Dans les environnements intérieurs, la présence de plusieurs espèces chimiques et de vapeur d'eau complexifie plus encore le phénomène d'adsorption. On notera que la température est également un paramètre très important en fonction duquel les cinétiques de sorption sont déterminées.

Les réactions chimiques de surface peuvent être classées selon trois catégories : la corrosion, l'accroissement cristallin et les réactions catalytiques. Dans les environnements intérieurs, seules les réactions catalytiques ont effectivement lieu. Lors de ces réactions, le matériau induit la transformation du composé gazeux adsorbé ou sa réaction avec d'autres espèces adsorbées sans souffrir d'altérations de sa surface. Ainsi, dans sa représentation la plus classique, on considère que deux molécules ont adsorbées physiquement. Le déplacement sur la surface de l'une d'entre elle permet la formation du composé complexe union des deux molécules. L'espèce chimique formée peut éventuellement ensuite se désolidariser du matériau pour rejoindre la phase gazeuse.

Toute cette complexité (adsorption physique, chimique, monocouche, multicouche, condensation, compétition entre polluants, réactions chimiques et conditions hygrothermiques) va conditionner les cinétiques de sorption et donc l'importance de l'interaction avec les matériaux sur l'équilibre de la concentration en polluants gazeux dans l'air.

■ 1.4. La réactivité dans l'air

Comme pour les interactions avec les matériaux, les réactions entre particules et entre polluants gazeux font appel à différents phénomènes.

Quand une particule rentre en contact avec une autre particule, elle tend à adhérer à cette dernière. Ce phénomène, connu sous le nom de coagulation, ne modifie pas la concentration en masse de particules mais induit un décalage de la répartition en tailles du nuage de particules. Or, les différents processus décrits plus haut dépendent fortement de la taille des particules. Cependant, la coagulation est un phénomène de second ordre en concentration, les phénomènes précédents étant du premier ordre. Cela signifie que la coagulation devient importante lorsque la concentration en particules est élevée. Pour le cas classique d'un environnement intérieur sans pollution spécifique, la coagulation est donc négligeable. À titre d'exemple, il a été montré que ses effets sur le niveau de concentration en particules dans le cas d'une fumée de cigarette dans un local peu ventilée étaient relativement faibles (Nazaroff et Cass, 1989).

Comme l'atmosphère, les ambiances intérieures constituent des milieux réactifs qui tendent à faire passer les composés gazeux émis dans l'air à un état d'oxydation toujours plus avancé au fil du temps. Les hydrocarbures (alcane, alcènes, composés aromatiques) sont ainsi successivement transformés en aldéhydes ou en cétones, en acides carboxyliques, puis finalement en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau. Ces transformations en chaîne mettent en jeu deux types de réactions chimiques : des réactions photolytiques au cours desquelles une molécule se décompose suite à l'absorption de rayonnement ultra-violet (décomposition du dioxyde d'azote,



NO₂, en monoxyde d'azote, NO, et en un atome d'oxygène par exemple : $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$), et des réactions de combinaison, qui résultent pour leur part de la collision entre deux molécules, et de la recombinaison de leurs atomes constitutifs pour former d'autres espèces chimiques (réaction entre ozone et monoxyde d'azote donnant lieu à la production de dioxyde d'azote et de dioxygène par exemple : $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$).

Pratiquement, les conséquences de la réactivité chimique sur la qualité de l'air intérieur sont que des espèces primaires émises dans l'air par la ventilation ou par des sources internes au bâtiment peuvent par ce fait être transformées en des polluants plus dangereux pour la santé. Dans la famille des aldéhydes évoquée ci-dessus comme des intermédiaires réactionnels des hydrocarbures, on trouve par exemple le formaldéhyde, qui est un composé cancérigène. Dans un autre domaine, Weschler et Shields (1999) ont mis en évidence la production dans l'air de nanoparticules acides à partir des réactions d'oxydation par l'ozone du d-limonène, un composé émis dans les bâtiments par les matériaux (bois) ou par différents produits de consommation courante tels que les produits de nettoyage ou les déodorants d'ambiance. Après avoir cherché à comprendre tous les rouages de ces mécanismes complexes à partir d'expériences en environnement contrôlé, les enjeux sont désormais d'une part de pouvoir quantifier la contribution des phénomènes réactifs aux concentrations ambiantes en polluants dans des bâtiments réels, et d'autre part d'identifier les facteurs qui ont la plus forte influence sur la production des composés jugés d'intérêt prioritaires en termes de santé (niveau d'ozone extérieur, intensité du rayonnement solaire, propriétés optiques des vitrages, température, ...).

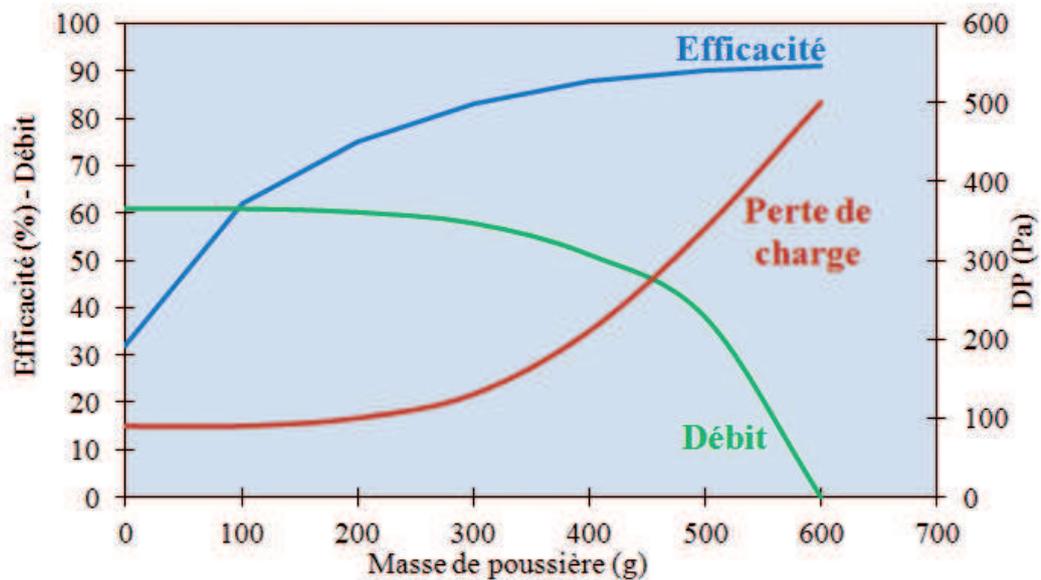
■ 1.5. La filtration et l'épuration de l'air

1.5.1 Les filtres à particules

Les notions relatives à l'efficacité

Le média filtrant des filtres mécaniques à particules est constitué de fibres de nature, de diamètre et de densité différentes suivant les produits, chacun de ces paramètres définissant au final l'efficacité du filtre pour une granulométrie de particules déterminée. Cette efficacité évolue également en fonction du temps : plus le média filtrant capte de poussières, plus il se colmate, donc plus il est dense et mieux il retient les particules de toutes tailles. Ainsi, d'une manière quelque peu contre intuitive, un filtre usagé présentera généralement une meilleure efficacité qu'un filtre neuf. Ceci pourrait résonner comme une véritable providence pour les maîtres d'ouvrage et les exploitants... et une ruine certaine pour les fabricants, si on occultait un aspect connexe fondamental, qui est l'augmentation de la perte de charge induite par le filtre avec le colmatage. Suivant le mode de régulation de l'installation, l'augmentation de l'efficacité par le fait du vieillissement s'accompagne soit d'une augmentation de la consommation énergétique du ventilateur pour maintenir un débit de ventilation constant, soit d'une diminution progressive du débit de ventilation, avec comme conséquences possibles l'apparition de pathologies du bâtiment ou de symptômes sanitaires liés à une humidité accrue dans les pièces (Figure 4).

Figure 4 : Évolution de l'efficacité, de la perte de charge et du débit d'air traité en fonction du colmatage du filtre (profils non applicables pour les filtres électret).



« L'efficacité d'un filtre à particules augmente avec la quantité de particules piégées. Cependant, sa perte de charge croît également ce qui entraîne soit une consommation énergétique du ventilateur pour maintenir un débit de ventilation constant, soit d'une diminution progressive du débit de ventilation comme présentée par cette figure. »

Pratiquement, ces considérations trouvent leurs répercussions à travers les points suivants :

- ▷ Un filtre à particules à une durée de vie déterminée par un niveau maximal de perte de charge induite admissible. En situation d'usage, chaque filtre installé dans le réseau de ventilation doit donc être équipé d'un manomètre différentiel qui mesure la résistance au passage de l'air occasionné par le filtre, et indique à l'exploitant le moment où il faut procéder à son remplacement (voir paragraphe 1.5.4).
- ▷ Dans les normes nationales et internationales, l'efficacité des filtres est définie comme une efficacité moyenne, ou intégrée, sur une période de temps déterminée par l'augmentation de la perte de charge du filtre de sa valeur à l'état neuf, à une valeur prédéfinie correspondant à sa perte de charge maximale admissible. Ceci est exposé en de plus amples détails dans le paragraphe qui suit.

La classification des filtres

Les normes françaises et européennes répartissent les filtres à air en 6 groupes et 17 classes d'efficacité. Les choses sont toutefois un peu plus complexes qu'elles ne pourraient l'être du fait que la méthode et l'aérosol d'essai diffèrent suivant le groupe auquel appartient le filtre. Comme dans beaucoup d'autres domaines techniques, il convient par ailleurs d'être conscient des différences qui peuvent exister entre l'efficacité définie par les normes, dans des conditions de fonctionnement spécifiques et maîtrisées (débit, type et taille des particules, concentration...), et l'efficacité en configuration réelle de fonctionnement, caractérisée notamment par des concentrations et une granulométrie des particules qui sont variables dans le temps.

Les filtres à air de ventilation générale

Les filtres du groupe G, pour Grossier, M pour Moyen, et F, pour Fin, constituent les filtres à air de ventilation générale. Leur efficacité est déterminée à partir de méthodes décrites dans la norme EN 779, qui a été révisée en 2012 (Tableau 1).

Les filtres du groupe G ne retiennent correctement que les grosses particules (agrégats de poussière, débris végétaux, insectes...) ; en ce sens, ils servent essentiellement de pré-filtre pour limiter l'empoussièrement des équipements de ventilation ou pour protéger des filtres plus fins. L'efficacité des filtres du groupe G est mesurée à partir d'un aérosol constitué de poussières



synthétiques dont la distribution en taille est représentative de la pollution particulaire atmosphérique, selon une méthode de mesure gravimétrique ; elle est exprimée en termes d'arrestance moyenne, A_m .

L'efficacité des filtres des groupes M et F est pour sa part déterminée par une méthode de comptage particulaire. L'aérosol utilisé pour les tests sur banc d'essai est le di-éthyle-hexyle sébaçate (DEHS), et l'efficacité de référence est l'efficacité moyenne (E_m) mesurée pour des particules de $0,4 \mu\text{m}$ jusqu'à un colmatage équivalent à une pression différentielle de 450 Pa. Pour les filtres électrets (voir définition ci-après), la norme EN 779 prévoit depuis 2002 qu'un test soit effectué avec et sans l'effet électret, ceci de manière à mettre en évidence la plus-value, mais aussi la chute d'efficacité en cours d'utilisation, des médias recourant à cet effet.

Tableau 1 : Classification des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme EN 779 (2012).

| Groupe | Classe | Perte de charge finale (Pa) | Efficacité moyenne (%) | Efficacité Minimale (*) (%) |
|--------|--------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| G | G1 | 250 | $50 \leq A_m < 65$ | - |
| | G2 | 250 | $65 \leq A_m < 80$ | - |
| | G3 | 250 | $80 \leq A_m < 90$ | - |
| | G4 | 250 | $A_m \geq 90$ | - |
| M | M5 | 450 | $40 \leq E_m < 60$ | |
| | M6 | 450 Pa | $60 \leq E_m < 80$ | |
| F | F7 | 450 Pa | $80 \leq E_m < 90$ | $E_m \geq 35$ |
| | F8 | 450 Pa | $90 \leq E_m < 95$ | $E_m \geq 55$ |
| | F9 | 450 Pa | $E_m \geq 95$ | $E_m \geq 70$ |

(*) L'efficacité minimale E_m est la plus basse des trois valeurs suivantes : efficacité initiale, efficacité après décharge ou efficacité pendant toute la procédure de charge du test. Un filtre qui vérifie la condition sur l'efficacité moyenne mais ne respecte pas la condition sur l'efficacité minimale est rétrogradé dans la classe (le groupe) inférieure.

Les filtres à air de très haute efficacité

Les filtres des groupes E et H et U constituent la famille des filtres à très haute et ultra haute efficacité ; ils sont aussi appelés filtres absolus. L'appartenance d'un filtre à l'un ou l'autre de ces groupes, puis sa classification de E10 à U17, est définie par l'application de la norme EN 1822, à partir de la mesure de l'efficacité globale (E_i), et de l'efficacité locale (E_l) du filtre vis-à-vis d'un aérosol test (DEHS, DOP, huile de paraffine,...) dont le diamètre est compris entre $0,1$ et $0,2 \mu\text{m}$ (Tableau 2). De par les différents mécanismes physiques mis en jeu dans la captation par un média fibreux, les particules de cette taille sont celles qui passent le plus facilement à travers le filtre. On les désigne ainsi par l'acronyme MPPS, pour Most Penetrating Particule Size.

Tableau 2 : Classification des filtres de très haute et ultra haute efficacité selon la norme EN 1822-1 (2011).

| Groupe | Classe | Efficacité Intégrée ⁽¹⁾ (%) | Efficacité locale ⁽²⁾ (%) |
|--------|--------|---|---|
| E | E10 | $E_i \geq 85 \%$ | - |
| | E11 | $E_i \geq 95 \%$ | - |
| | E12 | $E_i \geq 99.5 \%$ | - |
| H | H13 | $E_i \geq 99.95 \%$ | $E_i \geq 99.75$ |
| | H14 | $E_i \geq 99.995 \%$ | $E_i \geq 99.975$ |
| U | U15 | $E_i \geq 99.9995 \%$ | $E_i \geq 99.9975$ |
| | U16 | $E_i \geq 99.99995 \%$ | $E_i \geq 99.99975$ |
| | U17 | $E_i \geq 99.999995 \%$ | $E_i \geq 99.9999$ |

(1) Efficacité moyennée sur l'ensemble de la surface frontale de passage d'un élément filtrant, dans des conditions données de fonctionnement du filtre

(2) Efficacité en un point particulier de la surface frontale du filtre (Ei caractérise les passages préférentiels dus à l'hétérogénéité du média)

Figure 5 : Différentes typologies de filtres à air de ventilation générale.



« Afin d'augmenter la surface de captation d'un filtre à fibre et donc la quantité de particules piégées, différentes typologies de filtre ont été développées. »

Enfin, pour se démarquer de la concurrence, certains fabricants proposent parfois des produits agrémentés d'options, qui peuvent là aussi être de différents types :

- ▷ Les filtres électrostatiques passifs, dits également filtres électrets, utilisent des fibres synthétiques qui sont chargés électro-statiquement en usine pour amplifier les effets d'attraction électrostatique, et augmenter ainsi l'efficacité de captation des particules de petite et moyenne tailles. Ces filtres perdent toutefois leur charge électrostatique, et les effets bénéfiques qui y sont associés, à mesure que les poussières s'accumulent dans le média.



- ▷ Les filtres plastifiés sont traités avec des polymères de manière à rendre le média plus adhérent, et à éviter ou à réduire ainsi le risque de remise en suspension dans l'air de particules déposées lors de changements subits de pression dans l'installation (remise en marche de la ventilation des locaux le matin par exemple).
- ▷ Les filtres bio-statiques sont traités avec une substance biocide destinée à éliminer les microorganismes contenus dans l'air filtré, mais surtout à éviter que le média filtrant ne devienne lui-même un lieu de prolifération de ces microorganismes. Les filtres imprégnés de pesticides sont à proscrire en raison de la pollution qu'occasionne la diffusion lente de ces composés organiques semi-volatils dans l'air de ventilation. En revanche, les produits utilisant des espèces ioniques (ions argent notamment) comme agent bactéricide ne présentent a priori aucun risque sanitaire.

1.5.2. Les filtres moléculaires

Les filtres dits moléculaires captent les molécules gazeuses contenues dans l'air par adsorption à la surface d'un matériau appelé adsorbant. Dans le domaine du traitement de l'air, différents adsorbants peuvent être utilisés (zéolites, gel de silice, polymères, ...), mais les filtres sont le plus souvent constitués de fibres ou de grains de charbon actif. Ces charbons actifs peuvent être obtenus à partir d'un grand nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, ...) par des processus successifs de carbonisation (chauffage à haute température sans oxygène) et d'activation qui confèrent à la fois une forte porosité (40 à 80 %) et une très grande surface spécifique au matériau (600 à 2000 m²/g).

L'efficacité des filtres moléculaires est beaucoup plus difficile à apprécier que l'efficacité des filtres à particules. Cela tient à la conjugaison de deux facteurs. Le premier est que le processus mis en jeu dans la filtration moléculaire est dans la majorité des cas une adsorption physique, c'est-à-dire réversible, des molécules de polluant. Le second est que la capacité d'adsorption d'une espèce gazeuse par un adsorbant n'est pas une constante, mais dépend de sa concentration, de la température, de l'humidité et plus généralement de la présence d'autres espèces dans l'air. Ainsi, dans le contexte du traitement de l'air intérieur où chacun de ces paramètres fluctuent de manière plus ou moins aléatoire au gré des émissions de polluants et des conditions climatiques, non seulement l'efficacité peut être très variable d'un bâtiment à l'autre et d'une période à l'autre, mais le filtre peut même en certaines circonstances réémettre dans l'air des polluants préalablement captés.

1.5.3. Le choix des filtres

La filtration de l'air a deux fonctions distinctes : offrir une qualité de l'air minimale, sinon optimale, aux occupants, et éviter l'empoussièremement des équipements de l'installation de ventilation / conditionnement d'air (ventilateur, batteries chaudes et froides, échangeurs, ...) de manière à garantir leur pérennité et à maintenir leur efficacité énergétique dans le temps. En ce sens, on parle de chaîne de filtration, ou d'étapes de filtration, pour désigner le fait que des filtres de différents types sont à installer en différents points de la centrale de traitement d'air pour assurer pleinement chacune de ces deux fonctions. Suivant ce principe, des filtres plus ou moins grossiers protègent des filtres plus fins et plus efficaces positionnés en aval de l'écoulement d'air.

Les paragraphes qui suivent présentent les aspects réglementaires, ainsi que les préconisations des normes ou des acteurs habilités du secteur du traitement de l'air, concernant la filtration dans les bâtiments d'usage courant.

Les aspects réglementaires

Dans le cas des bâtiments tertiaires, le choix des filtres doit a minima respecter la réglementation, en l'occurrence le code du travail qui fixe les conditions de ventilation et de filtration dans les locaux à pollution non spécifique (pièces pour lesquelles la pollution ne provient que de la présence des personnes, à l'exclusion des locaux sanitaires). Il est mentionné dans l'article R.235-2-6 que « le maître d'ouvrage doit prévoir un système de filtration de l'air neuf quand il existe un risque de pollution de cet air et que son introduction est mécanique ». Les conditions de filtration sont alors précisées dans la circulaire du 9/05/1985 : un filtre d'efficacité supérieure à 90 % gravimétrique, c'est-à-dire équivalent à la classe G4 selon la norme EN 779, doit être mis en place au niveau de



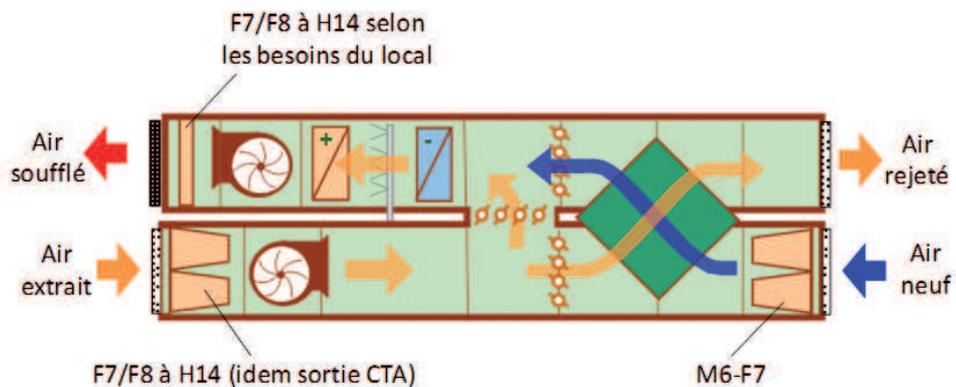
la prise d'air extérieur. L'article R.232-5-4 stipule par ailleurs que « l'air envoyé après recyclage dans les locaux à pollution non spécifique doit être filtré » et que « la filtration de l'air recyclé sera considérée satisfaisante si l'efficacité du système est supérieure à 50 % opacimétrique », ce qui correspond à un filtre de classe M5.

Les préconisations UNICLIMA

Uniclisma, le syndicat professionnel des industries aérauliques, thermiques et frigorifiques préconise la mise en place d'une chaîne de filtration composée (Figure 6) :

- ▷ Pour le premier rang, en entrée d'air, d'un filtre M6 au minimum, si possible F7 ;
- ▷ En deuxième rang, en sortie de centrale de traitement d'air, d'un filtre de type F7/F8 à H14 suivant le niveau de qualité particulaire de l'air requis dans les locaux ;
- ▷ Au niveau de l'extraction, d'un filtre de même type qu'en sortie de centrale de traitement d'air.

Figure 6 : Chaîne de filtration préconisée par UNICLIMA (1999) pour les bâtiments d'usage courant.



« En ventilation générale, une première filtration sur l'air extérieur est nécessaire pour protéger les composants de la centrale. Un second étage filtre l'air traité en fonction des besoins du local. L'air extrait est également filtré en fonction du niveau de pollution intérieure. »

La norme NF EN 13779

La norme NF EN 13779 (AFNOR, 2007) définit différents niveaux de qualité pour l'air neuf, différentes catégories de qualité souhaitée pour l'air intérieur, et les étapes de filtration d'air à mettre en place pour passer d'une catégorie à l'autre.

L'air neuf est classé en 3 niveaux de pollution, de ANF 1, correspondant à un air susceptible de n'être poussiéreux que temporairement (par exemple pollen), jusqu'à ANF 3, correspondant à un air où les concentrations en polluants gazeux et en particules sont très élevées (Tableau 3).

Tableau 3 : Définition des classes de qualité de l'air extérieur dans la norme NF EN 13779.

| Environnement | Niveaux de concentration | | | | | Classe de qualité de l'air extérieur (air neuf) |
|--|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---|
| | CO ₂ (ppm) | CO (mg/m ³) | NO ₂ (µg/m ³) | SO ₂ (µg/m ³) | PM10 (µg/m ³) | |
| Zone rurale sans sources de pollution importante | 350 | < 1 | 5 – 35 | < 5 | < 20 | ANF 1 |
| Petites villes | 400 | 1 – 3 | 15 – 40 | 5 – 15 | 10 – 30 | ANF 2 |
| Centres urbains | 450 | 2 – 6 | 10 – 50 | 10 – 50 | 20 – 50 | ANF 3 |



Pour la qualité de l'air intérieur, la norme NF EN 13779 reprend le principe de classification en 4 catégories de la norme NF EN 15251 (AFNOR, 2007) : les classes INT1, INT2, INT3 et INT4 correspondent respectivement à des exigences de qualité de l'air intérieur excellente, moyenne, modérée et basse.

Comme le montre le **Tableau 4**, le recours à la filtration moléculaire n'est recommandé qu'en zone de forte pollution de l'air extérieur (ANF3), si une qualité de l'air intérieur de classe 1 ou 2 est requise. Les filtres moléculaires doivent alors être combinés avec un filtre F7 en amont, et un filtre F9 en aval. L'humidité relative de l'air doit de plus être maintenue en dessous de 80 % pour garantir une efficacité correcte du filtre en charbon actif. Dans toutes les configurations, le texte de la norme précise qu'un pré-filtre (filtre du groupe G) doit être mis en place au niveau de la prise d'air neuf pour aider au maintien de la propreté des matériels de ventilation.

Tableau 4 : Niveaux minimum de filtration recommandés par la norme NF EN 13779 en fonction du niveau de pollution extérieure et du niveau de qualité de l'air intérieur désiré.

| Classe de qualité de l'air extérieur (air neuf) | Niveau de qualité de l'air intérieur | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| | INT 1 (Excellent) | INT 2 (Moyen) | INT 3 (Modéré) | INT 4 (Bas) |
| ANF 1 | F9 | F8 | F7 | M5 |
| ANF 2 | F7 + F9 | M6 + F8 | M5 + F7 | M5 + M6 |
| ANF 3 | F7 + FM(*) + F9 | F7 + FM(*) + F9 | M5 + F7 | M5 + M6 |

(*) Filtre moléculaire

La norme NF ISO 16814

La norme NF ISO 16814 (AFNOR, 2010) fixe des lignes directrices de conception de la filtration dans les bâtiments d'usage courant. Deux types de recommandations sont proposés suivant que le concepteur cherche à améliorer la qualité de l'air intérieur, ou simplement à protéger les équipements (**Tableau 5**). Dans le premier cas, il est préconisé de filtrer l'air en deux étapes pour protéger le filtre le plus fin. Si le choix doit néanmoins s'orienter vers une seule étape de filtration, l'exigence minimale de qualité est F5. La norme précise également que l'air recyclé doit disposer du même niveau de filtration, et qu'il peut être judicieux de recourir à la filtration moléculaire en milieu urbain. Dans ce cas, le filtre moléculaire doit être protégé par un filtre de classe M6, ou supérieure.

Tableau 5 : Correspondance entre les filtres et le niveau de pratique souhaité, d'après la norme NF ISO 16814 (AFNOR, 2010).

| Niveau de pratique | Protection des équipements | Amélioration de la QAI |
|--------------------|----------------------------|------------------------|
| Très bon | F7 | F7 + F9 |
| Bon | M6 | M5 + F8 |
| Acceptable | G4 | G4 + F7 |

1.5.4. Les aspects énergétiques et le remplacement des filtres

La consommation énergétique afférente à la filtration de l'air résulte de la consommation électrique additionnelle du (des) ventilateur(s) pour faire passer l'air à travers le(s) média(s) filtrant(s). Elle est directement proportionnelle à la perte de charge induite par le(s) filtre(s), ΔP (Pa), et peut être calculée par la relation :

$$E(kWh) = \frac{Q \times \Delta P \times t}{3600 \times \eta \times 1000}$$



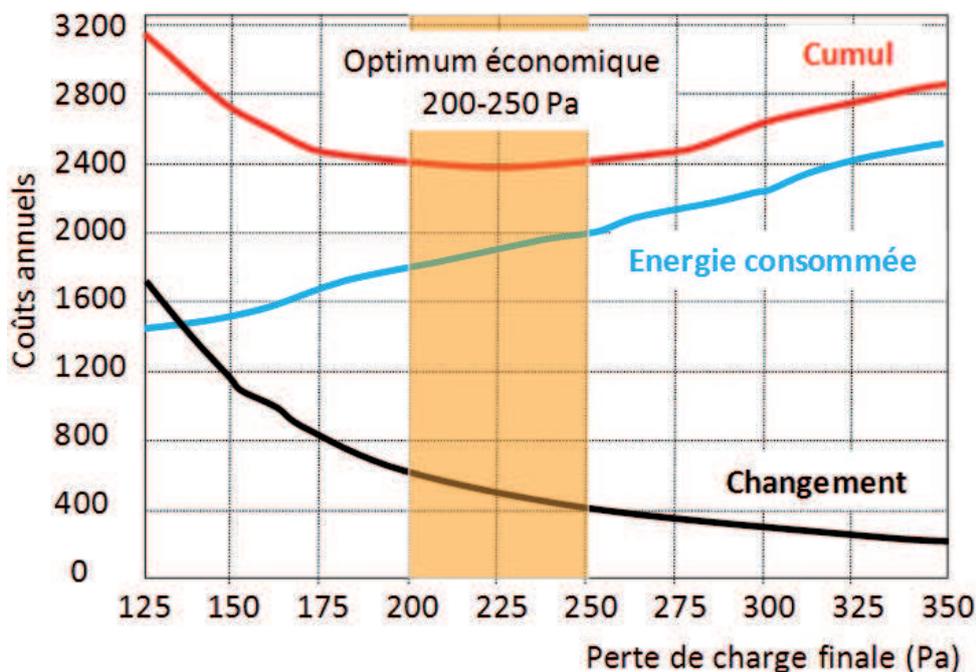
Où Q (m^3/h) correspond au débit volumique d'air qui passe à travers le filtre, η au rendement du ventilateur, et t (h) à la période de fonctionnement. Plus cette dernière est longue, plus le filtre se colmate, plus sa résistance à l'air est élevée, et finalement plus la consommation électrique est importante.

Pour garantir un débit de ventilation adéquat tout en maintenant les dépenses énergétiques dans des limites raisonnables, les filtres à particules doivent donc être remplacés dès lors que leur perte de charge atteint un seuil jugé critique. La fréquence minimale de renouvellement des filtres est ainsi déterminée par leur durée de vie, fixée à 250 Pa pour le groupe G, et 450 Pa pour les groupes M et F. Cependant, la norme NF EN 13053 (AFNOR, 2011) spécifie que les filtres doivent être changés plus fréquemment, à savoir quand leur perte de charge atteint :

- ▷ 150 Pa pour les filtres du groupe G ;
- ▷ 200 Pa pour les filtres M5, M6 et F7 ;
- ▷ 300 Pa pour les filtres F8 et F9.

Ces recommandations émanent de calculs visant à déterminer l'optimum économique entre les coûts de renouvellement du filtre (achat, mise en place, destruction), qui augmentent dès lors que le seuil critique de pression différentielle est abaissé (le filtre est remplacé plus souvent), et le coût énergétique de la filtration, qui augmente pour sa part avec le seuil critique de pression différentielle (colmatage plus important, et donc ΔP moyen plus élevé). Suivant le type de filtre utilisé et les conditions environnementales du site, la fréquence optimale de renouvellement se situe entre 180 et 250 Pa (Figure 7).

Figure 7 : Détermination de la fréquence de renouvellement du filtre sur la base de l'optimum économique (d'après AICVF, 2007).



« Suivant le type de filtre utilisé et les conditions environnementales du site, la fréquence optimale de renouvellement se situe entre 180 et 250 Pa. »



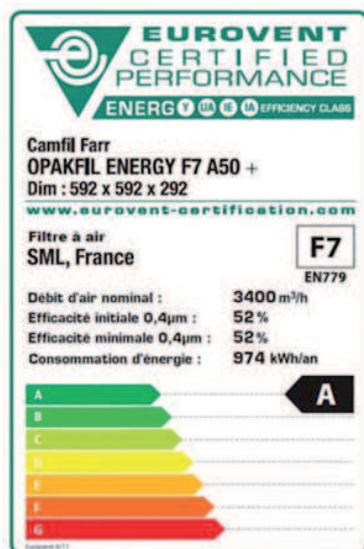
Pour aller plus loin dans la prise en compte de la question énergétique, qui constitue maintenant un point incontournable de la conception des bâtiments, la méthode Eurovent permet désormais de mettre en relation l'efficacité d'un filtre, déterminée suivant les principes de la norme EN 779, avec son impact énergétique, défini par l'affectation à une classe énergétique variant comme pour les appareils électroménagers de A à G. Après avoir mesuré la perte de charge moyenne du filtre exposé à un aérosol modèle et procédé au calcul de la consommation annuelle en énergie, la classe et l'étiquette énergétique du filtre (Figure 8) sont déterminées en utilisant les seuils définis dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Seuils de consommation énergétique annuelle définissant les 7 classes d'efficacité énergétique des filtres suivant la méthode Eurovent.

| Classe énergétique | G4 | M5 | M6 | F7 | F8 | F9 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | M = 350g ASHRAE | M = 250g ASHRAE | M = 100g ASHRAE | | | |
| A | 0 – 600 kWh | 0 – 650 kWh | 0 – 800 kWh | 0 – 1200 kWh | 0 – 1600 kWh | 0 – 2000 kWh |
| B | >600 – 700 kWh | >650 – 780 kWh | >800 – 950 kWh | >1200 – 1450 kWh | >1600 – 1950 kWh | >2000 – 2500 kWh |
| C | >700 – 800 kWh | >780 – 910 kWh | >950 – 110 kWh | >1450 – 1700 kWh | >1950 – 2300 kWh | >2500 – 3000 kWh |
| D | >800 – 900 kWh | >910 – 1040 kWh | >1100 – 1250 kWh | >1700 – 1950 kWh | >2300 – 2650 kWh | >3000 – 3500 kWh |
| E | >900 – 1000 kWh | >1040 – 1170 kWh | >1250 – 1400 kWh | >1950 – 2200 kWh | >2650 – 3000 kWh | >3500 – 4000 kWh |
| F | >1000 – 1100 kWh | >1170 – 1300 kWh | >1400 – 1550 kWh | >2200 – 2450 kWh | >3000 – 3550 kWh | >4000 – 4500 kWh |
| G | >1100 kWh | >1300 kWh | >1550 kWh | >2450 kWh | >3350 kWh | >4500 kWh |

M = quantité de poussière ASHRAE en gramme avec laquelle chaque filtre est chargé pour déterminer sa consommation d'énergie. Cette quantité de poussière est choisie sur la base d'une utilisation standardisée en CTA et pendant 1 an (6 000 h).

Figure 8 : Exemple d'étiquette énergétique d'un filtre



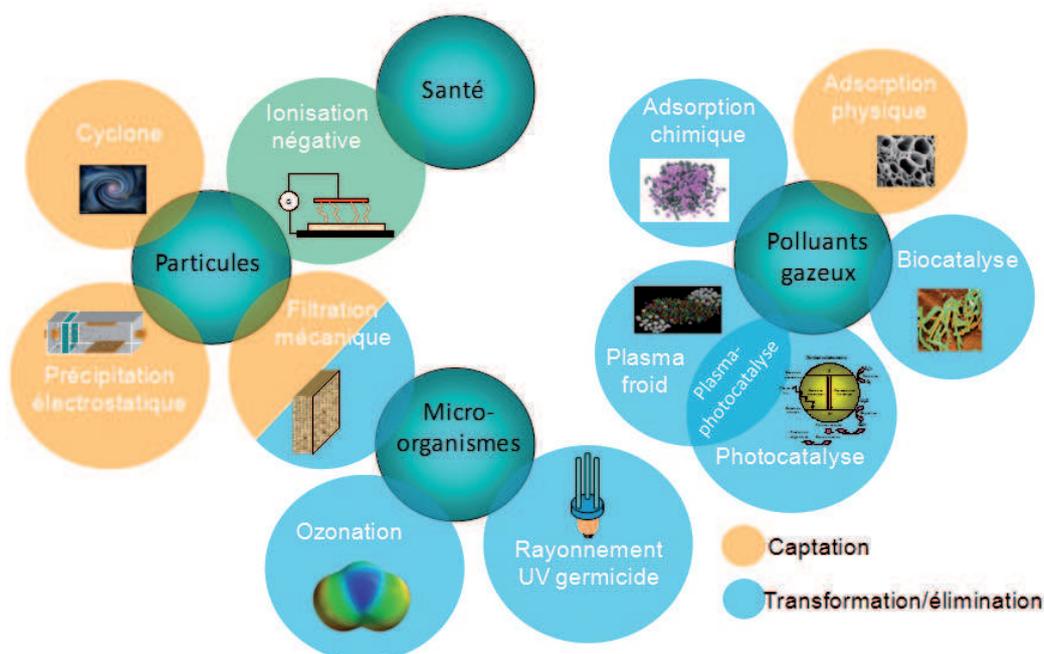


Dans le cas des filtres moléculaires, la définition de la fréquence à laquelle doivent être remplacés les filtres constitue sans aucun doute un problème aussi difficile à résoudre que ne l'est celui précédemment évoqué de la caractérisation de l'efficacité en conditions réelles d'usage. Non seulement le temps de saturation d'un polluant déterminé dépend du niveau de concentration et des conditions hygrothermiques dans lesquelles fonctionne le filtre, mais ce temps de saturation peut également différer de plusieurs ordres de grandeur d'un polluant à l'autre, ce qui pose inévitablement la question de l'espèce qui doit être prise comme référence pour statuer sur la fréquence de renouvellement du filtre : dans les environnements intérieurs caractérisés par la présence de plusieurs polluants en mélange dans l'air, doit-on se baser sur les temps de saturation les plus longs, et prendre acte du fait que le filtre sera rapidement inefficace vis-à-vis d'un grand nombre d'espèces (notamment les plus légères comme l'acétaldéhyde ou le formaldéhyde), ou sur les temps de saturation les plus courts, auquel cas le coût de revient apparaîtra sans doute prohibitif pour un grand nombre de maîtres d'ouvrage et d'exploitants ? Il n'existe actuellement pas d'outils pour définir les procédures de maintenance les plus adaptées au contexte environnemental des bâtiments.

1.5.5. Les techniques et les systèmes d'épuration

Il existe différentes techniques d'épuration de l'air en fonction de la nature des polluants visés (Figure 9), et différents types de produits pour le bâtiment : systèmes autonomes ou épurateurs domestiques fonctionnant par recyclage de l'air intérieur (Figure 10), cassettes à intégrer dans les centrales de traitement d'air ou aux réseaux de ventilation (Figure 11), matériaux de revêtement intérieur fonctionnalisés (Figure 12). Sans même évoquer les questions d'innocuité que soulèvent certaines techniques, le problème à l'heure actuelle est que les maîtres d'œuvre et d'ouvrage n'ont d'une part que peu d'informations sur la consommation énergétique induite par ces systèmes, et ne disposent d'autre part pas de garanties suffisantes sur leur efficacité en conditions réelles d'utilisation (mis à part pour les plantes où l'inefficacité est reconnue par l'ensemble de la communauté scientifique française !). Des normes AFNOR traitant de ce sujet (XP B44-200 et XP B44-03) ont récemment été publiées et devraient à terme contribuer à éclaircir la situation. En attendant, le recours à des produits qui n'ont pas fait l'objet de tests suivant ces normes doit être envisagé avec beaucoup de précautions.

Figure 9 : Recensement des techniques de filtration et d'épuration de l'air.



« Des techniques d'épuration de l'air à adapter à chaque type de polluant. »

Figure 10 : Épurateurs d'air autonomes fonctionnant par recyclage de l'air intérieur.



Figure 11 : Différents systèmes d'épuration de l'air à intégrer au réseau de ventilation / conditionnement d'air.

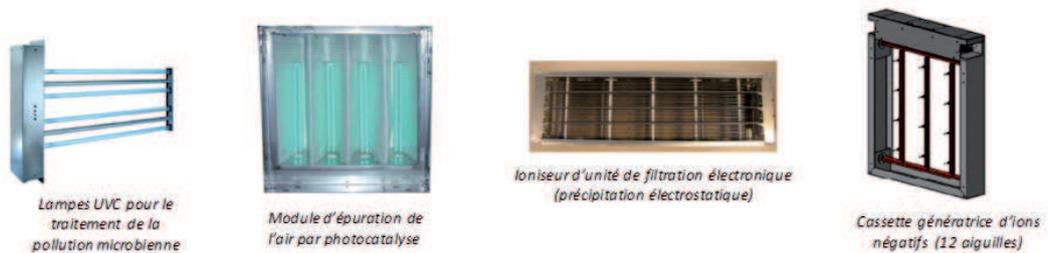


Figure 12 : Matériaux fonctionnalisés pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.



2. Quelques illustrations

■ 2.1. La variabilité de l'émission des sources de polluants

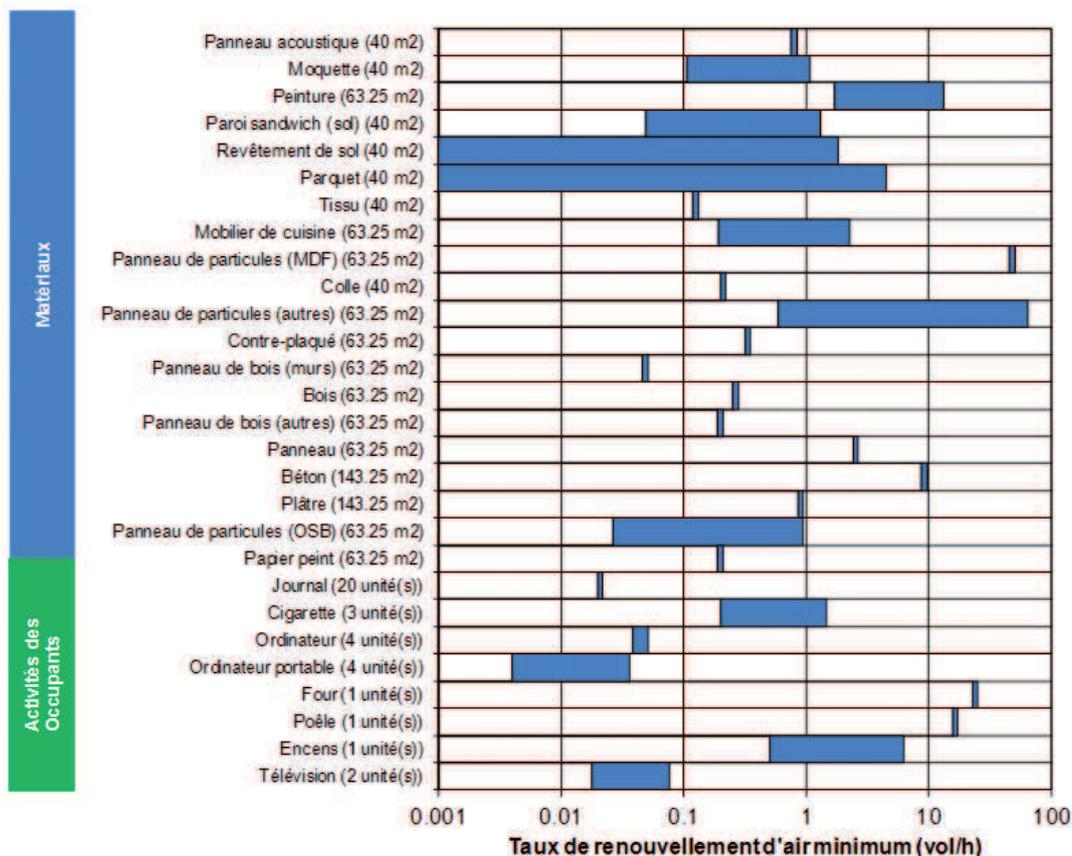
La présente illustration vise à illustrer d'une part la grande variabilité de l'émission des sources intérieures de polluants comme les matériaux neufs et les activités des occupants et, d'autre part, à évaluer le taux de renouvellement d'air nécessaire à imposer pour maintenir les concentrations en polluant inférieures à leur valeur toxicologique de référence (VTR), voir chapitre sur la réglementation. La résolution de l'équation présentée au début de ce chapitre permet ce calcul en supposant que le mélange de l'air introduit soit parfait c'est-à-dire une efficacité de ventilation égale à 1, que l'air introduit soit non pollué, qu'il n'y ait pas d'effet de sorption avec les parois c'est-à-dire que seule l'émission du polluant soit considérée, que l'émission soit indépendante du gradient de concentration entre l'air environnant et la source (hypothèse valable aux temps initiaux), et qu'il n'y ait aucune émission secondaire (réaction chimique entre différents composés dans l'air). Afin de pouvoir comparer les taux d'émission des matériaux et des occupants, une ambiance intérieure de référence a été définie. Elle a pour volume 100 m³ avec une surface de plancher de 40 m² et une hauteur sous plafond de 2,5 m. La surface de matériaux et le nombre de sources provenant de l'activité des occupants ont été déterminés par rapport à cette ambiance de référence. La Figure 13 rassemble les résultats pour le formaldéhyde obtenus à partir de la base de données PANDORE (Abadie et Blondeau, 2011).



On constate une très grande variabilité des émissions qui s'étendent sur une plage de quatre ordres de grandeurs pour la majorité d'entre elles. Pour les matériaux, les panneaux de bois émettent peu de formaldéhyde mais les panneaux de particules font partis des plus grandes sources de ce polluant avec les peintures. Les plus grandes sources de formaldéhyde provenant de l'activité des occupants sont la cuisson (four et poêle) et la combustion d'un bâton d'encens. Les hypothèses de calcul énoncées plus hauts sont fortes et tendent certainement à surestimer les taux de renouvellement d'air propre nécessaires au maintien de la concentration intérieure en dessous de la VTR. Cependant, on notera d'une part qu'après 28 jours, les émissions des matériaux sont toujours élevées et que les émissions provenant de certaines activités sont, et resteront puisque indépendantes du temps, fortes. Ainsi, les débits de ventilation nécessaires au maintien d'une bonne qualité de l'air vis-à-vis du formaldéhyde sont nettement supérieurs au débit minimum réglementaire, équivalent dans cet exemple à 0,5 vol/h.

Dans l'ensemble, on remarque donc que l'émission de formaldéhyde des matériaux est plus importante que celle des activités des occupants. Seuls les produits de cuisson et les fumées d'encens et de cigarettes présentent des niveaux comparables ; les émissions des équipements électroniques émettant à des niveaux bien inférieurs. On peut conclure que pour des ambiances de bureaux, la prise en compte des matériaux est beaucoup plus importante que celle des activités des occupants pour les émissions de formaldéhyde. La même conclusion s'applique d'ailleurs au benzène, à l'acétaldéhyde et au xylène. Cependant, l'importance des équipements électroniques est du même ordre de grandeur que celle des matériaux pour d'autres polluants comme le toluène et le styrène.

Figure 13 : Taux de renouvellement d'air par source de formaldéhyde – VTR à 28 jours = $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, d'après Abadie et Blondeau (2011).



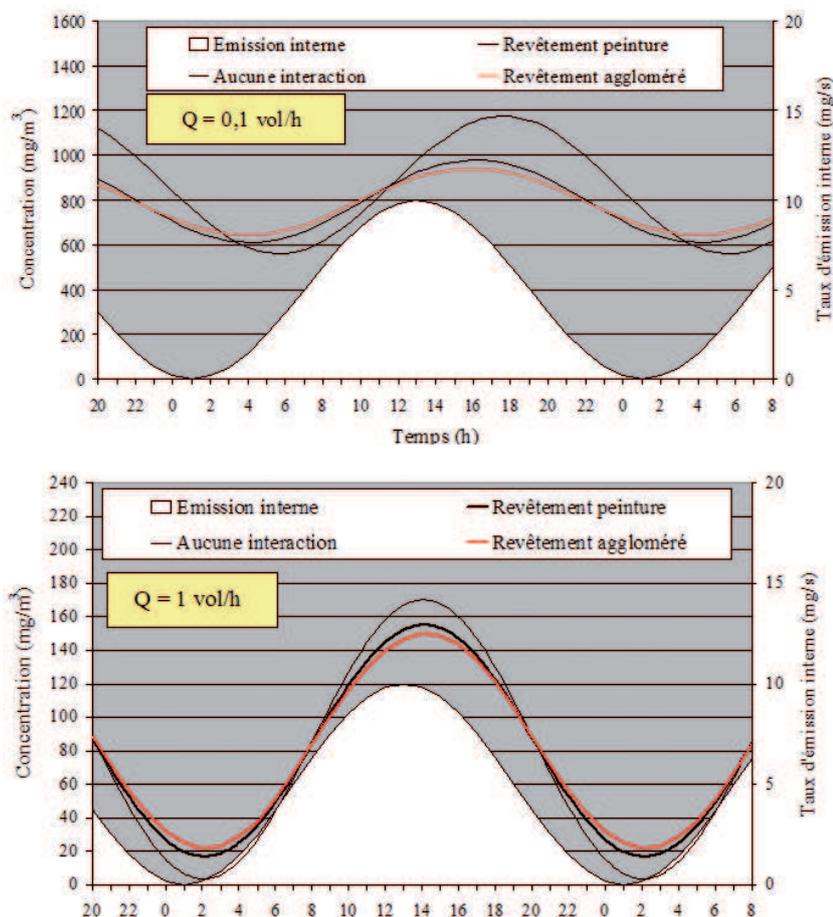
« Le taux de renouvellement d'air propre nécessaire au maintien de la concentration intérieure en formaldéhyde en dessous d'une valeur toxicologique de référence est très variable en fonction des sources intérieures. Les sources prépondérantes sont les panneaux de particules neufs, les peintures fraîches et les produits de cuisson. On notera que, pour l'exemple considéré, le taux de renouvellement d'air réglementaire correspond à 0,5 vol/h et que celui-ci n'est donc pas en mesure d'assurer une bonne qualité de l'air intérieur. »

■ 2.2. L'Interaction entre matériaux et polluants gazeux : illustration de l'effet tampon des matériaux

Allard *et al.* (2002) mettent en évidence l'effet tampon des matériaux sur la variation de la concentration en acétone dans le cas d'un bureau de référence (surface de plancher de 64 m², hauteur sous plafond de 3.2 m). Dans tous les cas de figure traités, les seuls vecteurs de transport de l'acétone sont la ventilation, les interactions avec les parois et les sources internes. A partir de la résolution de l'équation présentée au début de ce chapitre, les variations de la concentration en polluant sont établies pour une journée selon six scenarii : deux taux de renouvellement d'air et trois niveaux d'interaction avec les matériaux des parois (« revêtement aggloméré », « revêtement peinture » et sans interaction). L'émission de la source choisie ici est de type sinusoïdal sur une période de 24 heures avec un pic de 10 mg/s à 13h. La Figure 14 présente les profils de concentrations intérieures obtenus pour les cas traités.

Comme l'expliquent les auteurs, outre les différences de niveau moyen des concentrations entre les deux graphes qui vient d'une plus forte extraction du polluant par la ventilation lorsque le taux de renouvellement d'air augmente, les éléments d'analyse les plus intéressants viennent de la comparaison des courbes obtenues pour un même taux de renouvellement d'air : quel que soit le matériau de revêtement testé, un déphasage temporel et un amortissement des profils de concentration, par rapport à ce que l'on obtiendrait s'il n'y avait aucune interaction, apparaissent. On observe ici un élément bénéfique du point de vue de la qualité de l'air de l'interaction avec les matériaux qui permet une diminution de la concentration maximale atteinte dans l'air de l'ambiance de plus de 10 % pour des taux de renouvellement d'air inférieurs à 1 vol/h.

Figure 14 : Comparaison des profils de concentrations intérieures correspondant aux cas de « revêtement aggloméré », « revêtement peinture » et « aucune interaction avec les parois », graphes tirés de l'étude d'Allard *et al.* (2002).



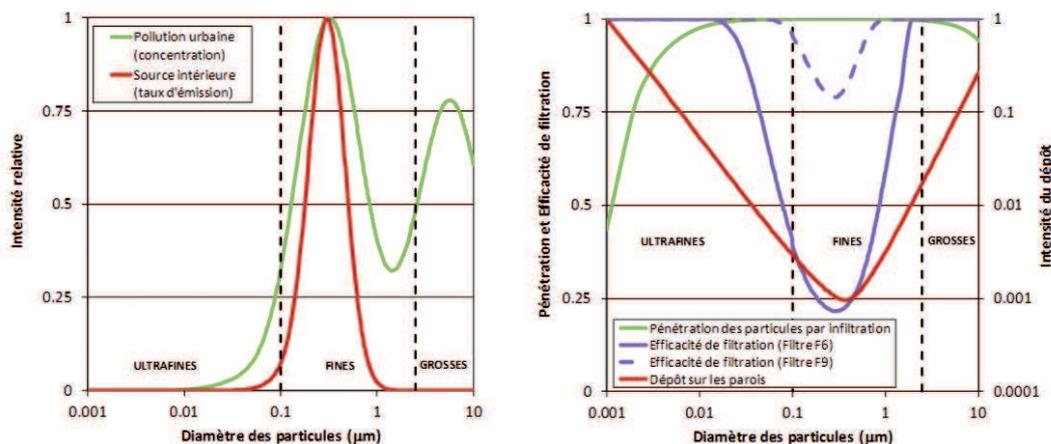
« Par adsorption et désorption de COV, les matériaux sont capables de réduire les pics de pollution de l'air intérieur et ainsi de limiter les temps d'exposition des occupants à des concentrations élevées. Cet effet tampon est évalué à 10% pour l'exemple traité ici. »

■ 2.3. La concentration intérieure en particules d'une ambiance

La présente illustration vise à présenter les différents processus intervenant dans l'équilibre massique de la pollution particulaire intérieure. Soit une ambiance intérieure de référence de volume 100 m^3 avec une surface de plancher de 40 m^2 et une hauteur sous plafond de 2.5 m . La concentration intérieure en particules dépend du transport des particules extérieures par la ventilation et les infiltrations à travers l'enveloppe. Si on considère notre ambiance en site urbain alors la concentration extérieure en particules ultrafines ($dp \leq 0,1 \mu\text{m}$) est de $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, celle en particules fines ($0,1 < dp \leq 2,5 \mu\text{m}$) de $40,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et celle en particules grossières ($2,5 < dp \leq 10 \mu\text{m}$) de $19,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La distribution granulométrique de la pollution urbaine est présentée par la [Figure 15](#) (graphe de gauche). Les particules extérieures pénétrant par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment vont être filtrées en partie pour les particules ultrafines et, dans une moindre mesure, les particules grossières ([Figure 15](#), graphe de droite). On remarquera que 100 % des particules fines extérieures se retrouvent dans l'ambiance lorsqu'elles pénètrent par infiltration. Les particules extérieures peuvent également transiter via un réseau de ventilation et être en partie retenues par un filtre à fibre. Le graphe de droite de la [Figure 15](#) présente l'efficacité de filtration de deux filtres (F6 et F9). Les deux types de filtre retiennent très bien les particules grossières et un peu moins efficacement les particules ultrafines. Par contre, une très grande partie des particules fines traversent ces filtres et se retrouvent donc dans l'ambiance. La concentration intérieure en particules dépend également de la présence de sources internes. Les particules émises par de l'encens ont été considérées pour cette illustration. La distribution granulométrique de cette source intérieure est présentée par la [Figure 15](#) (graphe de gauche). Cette source émet essentiellement des particules fines et ultrafines à un taux d'environ $2 \text{ mg}/\text{h}$. Une fois dans l'ambiance, un dernier facteur contribue à baisser le niveau de pollution particulaire : le dépôt sur les surfaces, en particulier les parois. Le graphe de droite de la [Figure 15](#) présente l'intensité du dépôt en fonction de la taille des particules, c'est la fameuse courbe en « V ». D'un côté, les particules grossières se déposent sur les parois horizontales sous l'action de la gravité alors que, de l'autre côté, les particules les plus petites, qui sont soumises aux forces Browniennes induites par l'agitation moléculaire, tendent à se déposer sur toutes les surfaces de l'ambiance. Entre ces deux extrêmes, les particules fines ne se déposent pratiquement pas. La concentration intérieure est déterminée par la résolution de l'équation présentée au début de ce chapitre que nous allons considérer indépendante du temps pour cette illustration. Deux taux de renouvellement d'air neuf ont été considérés ici : $0,5 \text{ vol}/\text{h}$ qui correspond à un niveau sanitaire et $2,0 \text{ vol}/\text{h}$. Les infiltrations d'air extérieur sont équivalentes à $0,2 \text{ vol}/\text{h}$, valeur représentative des infiltrations à travers une des parois de l'ambiance pour un bureau d'après le Règlementation Thermique 2005. La [Figure 16](#) présente les contributions du dépôt, de l'infiltration, de la ventilation mécanique et de la source à l'équilibre de la concentration intérieure en particules de l'ambiance pour deux types de filtres et de renouvellement d'air (les deux cas extrêmes). Ces graphes montrent l'effet de puits et de sources des différents processus. Ainsi, pour le premier cas (Filtre F6 avec un taux de renouvellement de $0,1 \text{ vol}/\text{h}$), le dépôt a un rôle équivalent, voire plus important, que la ventilation pour l'élimination des particules ultrafines et grossières de l'air intérieur. Pour les particules fines, la ventilation reste le seul moyen de réduire l'exposition. L'infiltration a quant à elle un rôle positif (effet de puits pour les particules fines) ou un rôle négatif pour les autres tailles de particules. Le second cas montre la réduction du rôle du dépôt qui devient complètement négligeable pour les particules fines avec l'augmentation du taux de renouvellement d'air. La part négative des infiltrations augmente alors avec la diminution de l'importance de l'émission de particules par la source intérieure. La dernière [Figure \(Figure 17\)](#) montre les niveaux de concentrations intérieures en particules de l'ambiance pour les quatre configurations étudiées. Pour l'exemple traité, on remarque que la pollution de l'air intérieur est causée par les particules fines, les quantités de particules ultrafines et grossières étant effectivement très largement négligeables. De plus, l'amélioration de la filtration de l'air ventilé est supérieure pour de forts taux de renouvellement d'air (environ 30 % de réduction de la concentration intérieure) que pour de faibles débits (seulement 10 %).

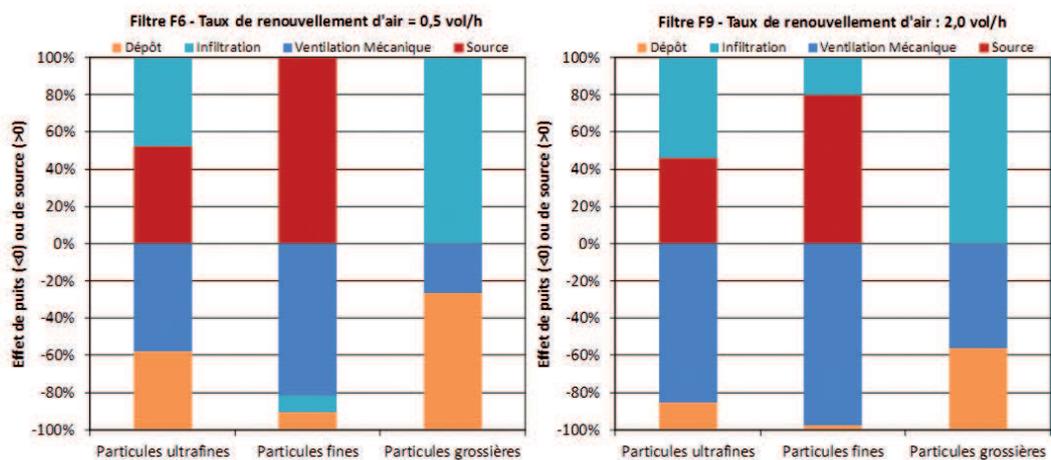


Figure 15 : Distributions granulométriques de la pollution urbaine, de l'émission d'une source intérieure en particules, de la pénétration de particules extérieures par infiltration d'air à travers l'enveloppe du bâtiment, de l'efficacité de filtration de filtres F6 et F9 et du dépôt sur les parois intérieures de l'ambiance.



« Dans le graphe de gauche, on remarque que la pollution urbaine regroupe essentiellement des particules fines et grosses et que l'encens ne produit pratiquement que des particules fines. Le graphe de droite synthétise la pénétration de particules extérieures par infiltration, la filtration de deux filtres à fibres et le dépôt sur les parois de l'ambiance. Il en ressort que seules les particules fines pénètrent à l'intérieur de l'ambiance et que les particules de cette taille ne se déposent pratiquement pas sur les parois de l'ambiance. »

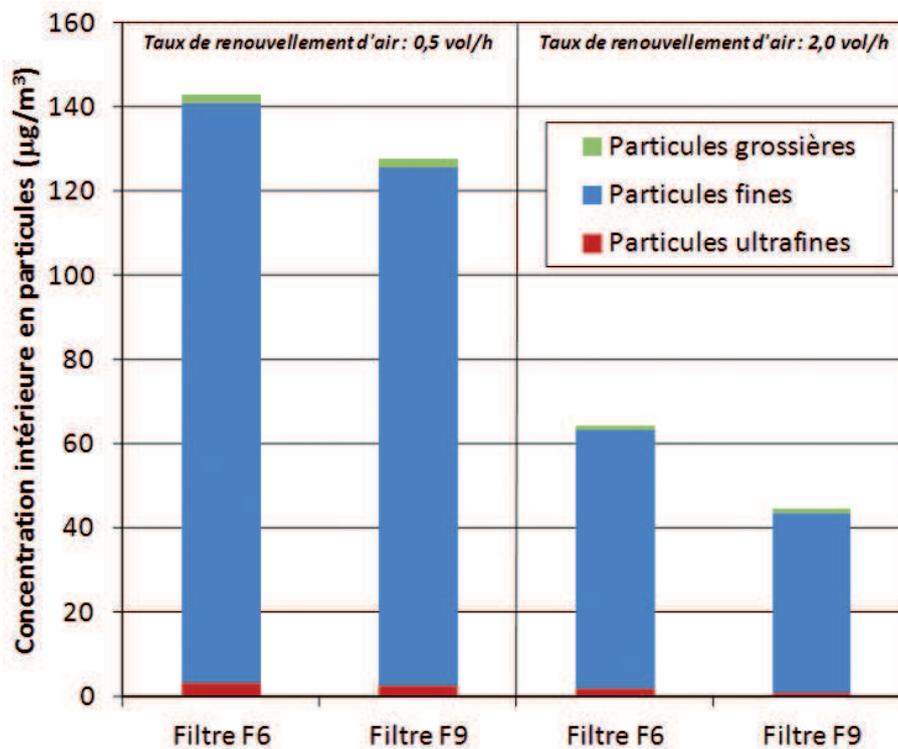
Figure 16 : Contributions du dépôt, de l'infiltration, de la ventilation mécanique et de la source à l'équilibre de la concentration intérieure en particules de l'ambiance pour deux types de filtres et de renouvellement d'air.



« L'infiltration d'air pollué extérieur et l'émission de particules par une source intérieure dégrade la qualité de l'air intérieur dans des proportions différentes en fonction de la taille des particules. La ventilation munie d'un filtre même peu efficace a un impact positif sur la qualité de l'air pour l'exemple traité. Le dépôt sur les parois joue un rôle de « filtration » important pour les particules ultrafines et grosses et négligeable pour les particules fines. »



Figure 17 : Concentrations intérieures en particules de l'ambiance pour des filtres F6 et F9 et des taux de renouvellement d'air de 0,5 et 2,0 vol/h.



« Pour l'exemple traité, l'essentiel de la pollution intérieure est constitué de particules fines. La qualité de l'air est améliorée par augmentation de l'efficacité du filtre et/ou du taux de renouvellement d'air. »



Chapitre 4

Les méthodes d'évaluation de la QAI et la hiérarchisation des polluants

1. L'évaluation des risques

Les méthodes d'évaluation des risques liés à la qualité de l'air dépendent des effets sanitaires suscités par les polluants. Ceux-ci peuvent être toxiques et/ou allergisants avec effet de seuil (l'effet apparaît au-delà d'un certain niveau d'exposition), cancérigènes, mutagène ou toxiques pour la reproduction (CMR), sans effet de seuil (toute exposition au polluant présente un risque, quelle que soit sa concentration), ou constituer des perturbateurs endocriniens. Certaines substances peuvent générer des pathologies de différents types, comme par exemple le formaldéhyde qui est à la fois toxique et cancérigène. Ces substances sont dans ce cas couvertes par les méthodes d'évaluation des risques relatives à chacun des effets concernés.

■ 1.1. Les composés toxiques et allergènes

L'évaluation des risques sanitaires suscités par la présence d'un polluant toxique ou allergène dans l'air repose sur l'application du paradigme édicté par le docteur Paracelse au XVII^e siècle « c'est la dose qui fait le poison ».

Pratiquement, la première étape des méthodes d'évaluation des risques sanitaires consiste ainsi à déterminer l'exposition au polluant de l'individu, ou du groupe d'individus subissant la pollution. Cette exposition représente la dose de polluant absorbée par le corps pendant une période de temps déterminée. Elle est le plus souvent définie comme la moyenne pondérée par le temps des concentrations dans les différents microenvironnements intérieurs et extérieurs que fréquentent les sujet cibles au cours de cette période. On distingue par ailleurs l'exposition chronique, qui correspond à une exposition récurrente à un polluant ou un mélange de polluants, et l'exposition aiguë, qui caractérise pour sa part l'exposition sur un temps court à une concentration élevée d'une substance.

Pour juger du risque sanitaire encouru, l'exposition est ensuite comparée à des valeurs limites d'exposition (VLE) aiguë ou chronique établies par les autorités sanitaires sur la base de données toxicologiques et épidémiologiques (notion de seuil). Il existe plusieurs types de VLE :

- ▷ Les valeurs toxicologiques de référence (VTR) ont été définies à partir d'expériences animales en appliquant un facteur de sécurité d'au minimum 100 pour leur transposition à l'humain.
- ▷ Les valeurs guides pour l'air intérieur (VGAI), comme leur dénomination l'indique, ont été élaborées pour traiter spécifiquement de problèmes de qualité de l'air intérieur. Elles correspondent aux seuils d'exposition en dessous desquels les experts jugent qu'aucun risque n'est encouru pour les personnes les plus vulnérables (enfants, personnes âgées, malades, etc.). Ces valeurs, qui peuvent être sujettes à révision en fonction de l'évolution des connaissances, ont été établies, ou sont en cours d'établissement par les organismes compétents à l'échelle nationale (ANSES), européenne (DG SANCO) ou mondiale (Organisation Mondiale de la Santé), pour les polluants jugés d'intérêt prioritaire au regard croisé de leur toxicité et de leur niveau de concentration mesuré dans les principaux lieux de vie ([Tableau 1](#)).

Tableau 1 : Valeurs Guides pour l’Air Intérieur (VGAI) faisant référence en France (ANSES) et établies aux niveaux européen (INDEX) et mondial (OMS).

| Polluant | VGAI (temps d'exposition) | Origine |
|-----------------------------|--|-----------------------|
| Monoxyde de carbone | 100/60/30/10 mg/m ³ (15 min/30 min/1h/8h) 7 mg/m ³ (24h) | ANSES OMS |
| Naphtalène | 10 µg/m ³ (long terme) | INDEX ANSES OMS |
| Dioxyde d’azote | 200/40 µg/m ³ (pointe/1 semaine) 40 µg/m ³ (1 an) | INDEX OMS |
| Formaldéhyde | 50/10 µg/m ³ (2h/long terme) 30 µg/m ³ (30 min) 100 µg/m ³ (30 min) | ANSES INDEX OMS |
| Benzène | 20/10/2 µg/m ³ (1 an / > 1 an/ vie) | ANSES |
| Particules PM2.5 PM10 | 25/10 µg/m ³ (24h/long terme) 50/20 µg/m ³ (24h/long terme) | ANSES ANSES |
| Trichloroéthylène | 20 µg/m ³ (long terme) | ANSES |
| Tétrachloroéthylène | 1380/250 µg/m ³ (courte durée/long terme) 250 µg/m ³ (1 an) | ANSES OMS |

(1) Agence Nationale de Sécurité Sanitaire

(2) Organisation Mondiale de la Santé

(3) Projet INDEX (DG SANCO) "Critical Appraisal of the Setting and Implementation on Indoor Exposure Limits in Europe Union"

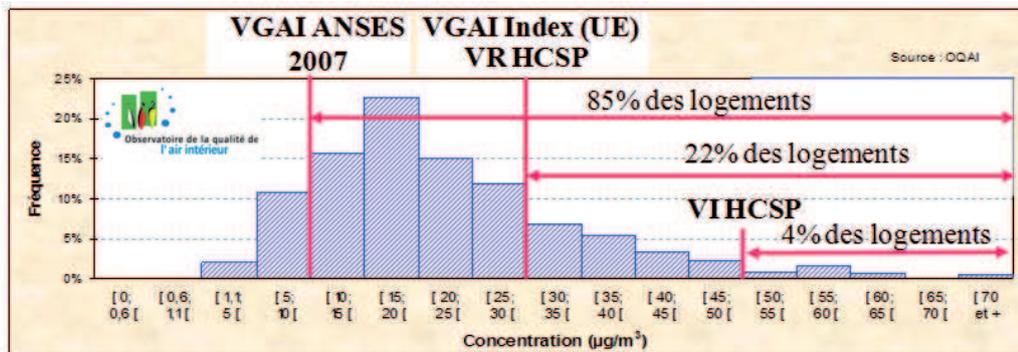
▷ Ces VLE ne doivent pas être confondues avec les valeurs de gestion, qui sont des seuils décisionnaires définis par les pouvoirs publics, en l’occurrence en France le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP), pour déclencher différents types d’action en fonction des niveaux de concentration mesurés dans les lieux publics. Les valeurs de gestion intègrent des critères toxicologiques, mais tiennent également compte d’éléments pratiques, voire politiques, relatifs aux conséquences financières ou sociales que peuvent impliquer les dépassements de seuil : coût des travaux à mettre en œuvre pour améliorer la situation, fermeture de l’établissement, ... Pour le formaldéhyde, le HCSP a par exemple établi les valeurs de gestion et les mesures d’accompagnement suivantes :

- Une valeur cible de 10 µg/m³, correspondant à un objectif de bonne qualité de l’air vis-à-vis de ce polluant (niveau équivalent à la VGAI pour une exposition chronique).
- Une valeur repère de 30 µg/m³, correspondant à un niveau de concentration acceptable en dessous duquel il n’y a pas d’action spécifique à engager à court terme.
- Une valeur d’information et de recommandation de 50 µg/m³, correspondant à la valeur maximale admissible pour une exposition de longue durée ; si les concentrations mesurées sont supérieures à ce seuil, le HCSP recommande que des mesures soient prises pour abaisser le niveau moyen de concentration en formaldéhyde en-dessous de la valeur repère.
- Une valeur d’action rapide de 100 µg/m³, seuil au-delà duquel des travaux doivent rapidement être engagés pour ramener les concentrations en dessous de la valeur repère de 30 µg/m³.

Il suffit de se reporter à la distribution des concentrations en formaldéhyde mesurées dans le cadre de la campagne logements de l’Observatoire de la Qualité de l’Air Intérieur (Figure 1) pour illustrer l’extrême sensibilité de la définition de ces valeurs de gestion. En se basant sur la valeur d’information établie par le HCSP, seuls 4 % des logements devraient faire l’objet de travaux pour abaisser l’exposition des occupants au formaldéhyde. En prenant comme point de référence la valeur repère, il faut en revanche conclure que l’exposition est excessive dans presque un quart des logements investigués. Enfin, en se référant à la VGAI, fixée donc à 10 µg/m³ par l’ANSES et prise comme valeur cible par le HCSP, le niveau de concentration en formaldéhyde présenterait potentiellement un risque pour la santé dans 85 % des logements français...



Figure 1 : Répartition des concentrations en formaldéhyde dans les 567 logements investigués dans le cadre de l'OQAI, d'après Kirchner (2011).



« En fonction des valeurs guides considérées, un traitement pour diminuer les concentrations en formaldéhyde devrait concerner de 4 à 85% des logements. »

À ce jour, des valeurs de gestion ont également été établies pour le perchloroéthylène (composé utilisé pour le nettoyage à sec dans les pressings) le radon, le benzène, le trichloroéthylène, le tétrachloroéthylène et le naphthalène. Des seuils décisionnaires doivent prochainement être proposés pour le benzène.

Dans le cas des composés allergènes, il est d'usage d'établir une distinction entre le seuil de sensibilisation à l'allergie, c'est-à-dire le niveau d'exposition chronique au-delà duquel il a été démontré un risque pour certaines personnes de produire des anticorps de l'allergie, et le seuil de déclenchement de l'allergie, c'est-à-dire le niveau de concentration au-dessus duquel il y a risque d'allergie pour une personne sensibilisée. Pour l'allergie aux acariens, ces niveaux de concentration sont par exemple le plus souvent exprimés en termes de teneur en éléments allergènes, Der f 1 et Der p 1, par unité de masse de poussière déposée au sol ou sur le matelas. Le seuil de sensibilisation est de 2 µg/g de poussière, tandis que le risque de crise asthmatique apparaît à partir de 10 µg Der p 1/g de poussière. La littérature scientifique montre toutefois que les facteurs génétiques constituent le principal déterminant de l'allergie et que l'exposition aux allergènes d'acariens ne pose aucun problème de santé pour près de 80 % de la population, même à des concentrations élevées.

Lorsqu'elles sont disponibles, les VGAI sont par nature les valeurs limite d'exposition les plus adaptées pour appréhender objectivement le niveau de pollution d'une ambiance intérieure. La comparaison des expositions mesurées aux VGAI respectives des polluants présents dans l'air constitue une première approche du risque sanitaire encouru : si les expositions sont inférieures aux VGAI, le danger est a priori nul. Partant du principe que les conditions d'ambiance sont d'autant meilleures que les concentrations en polluants sont faibles, il est par ailleurs possible dans cette situation de quantifier le degré de qualité de l'air sur une échelle unitaire en calculant, pour chacun des polluants, le ratio entre exposition et VGAI : l'obtention de valeurs proches de 0 pour l'ensemble des indicateurs témoigne ainsi d'une bonne qualité de l'air globale ; a contrario, les indicateurs présentant les valeurs les plus élevées permettent de cibler les polluants dont la présence est la plus préoccupante.

Bien qu'intéressante de par sa simplicité de mise en œuvre et d'interprétation des résultats, cette méthode d'évaluation n'en demeure pas moins très imparfaite, notamment parce qu'elle n'intègre pas les possibles effets synergétiques entre polluants. On sait par exemple aujourd'hui que l'ozone, qui est un irritant respiratoire, augmente le risque de crise d'asthme en saison pollinique, et rend plus sévères les inflammations bronchiques suscitées par l'inhalation d'aldéhydes. D'après l'OMS, les fumeurs chroniques courent également 20 à 25 fois plus de risque de contracter un cancer du poumon qu'un non fumeur, à des concentrations moyennes de radon telles que celles communément observées dans les habitations de diverses régions du monde (Communiqué de presse de l'OMS du 15/12/2010). Aussi intéressants soient-ils, ces quelques



résultats sur les effets sanitaires croisés des polluants de l'air intérieur apparaissent dérisoires au vu de l'immensité du champ de connaissances à acquérir. Le nombre, la nature et les concentrations des polluants présents en mélange dans l'air sont si variables en fonction du temps et des environnements qu'il est difficilement concevable d'imaginer un jour disposer des éléments nécessaires pour évaluer finement et en toutes circonstances les effets de la pollution de l'air sur la santé. Dans ces conditions, il est toujours possible de calculer un indice de qualité globale de l'air intérieur en combinant les concentrations et les VGAI de chacun des polluants présents dans l'ambiance, mais l'indice obtenu n'aura dans la plupart des cas pas de réelle signification quant au risque sanitaire encouru. Les études permettant de corréler un indice de qualité de l'air multi-polluant avec des symptômes sanitaires ressentis par les occupants des bâtiments sont très rares. Une analyse critique en est livrée dans le paragraphe 2 de ce chapitre.

■ 1.2. Les composés cancérigènes

La plupart des scientifiques pensent que l'environnement dans lequel on vit joue un rôle prépondérant, devant l'héritage génétique, dans l'augmentation du risque de contracter un cancer (Lichtenstein et al., 2000). Si le lien direct entre un environnement particulier est un type de cancer reste souvent difficile à déterminer, l'évaluation des effets cancérigènes de substances spécifiques est quant à elle possible. Ainsi, on peut dresser des listes de substances ou de mélanges de substances en fonction de leurs effets sur la santé. On distingue trois classes de danger que sont la cancérogénicité (C), la mutagénicité sur les cellules germinales (M) et la toxicité pour la reproduction (R). Depuis le 20 janvier 2009, le classement CMR a été harmonisé à l'échelle européenne par l'adoption du règlement 1272/2008 relatif à la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges (la liste contient un peu plus de 4000 substances). Ce classement a valeur réglementaire en France. Pour chacune des classes CMR, on distingue trois catégories en fonction de la connaissance et de la certitude dont dispose la communauté scientifique sur la substance :

- ▷ Catégorie 1A (anciennement 1) : substances et préparations que l'on sait être CMR pour l'homme (données épidémiologiques) ;
- ▷ Catégorie 1B (anciennement 2) : substances et préparations pour lesquelles il existe une forte présomption que l'exposition de l'homme à de telles substances et préparations peut provoquer ou augmenter la fréquence d'apparition des effets CMR cités ci-dessus (études appropriées à long terme sur l'animal ou autre information appropriée) ;
- ▷ Catégorie 2 (anciennement 3) : substances et préparations préoccupantes pour l'homme en raison d'effets CMR possibles mais pour lesquelles les informations disponibles sont insuffisantes pour classer ces substances et préparations dans la catégorie 1B.

D'autres classifications existent comme celle du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), qui classe près de 1000 substances selon 5 groupes :

- ▷ Groupe 1 : cancérigènes pour l'homme ;
- ▷ Groupe 2A : probablement cancérigènes pour l'homme ;
- ▷ Groupe 2B : peut-être cancérigènes pour l'homme ;
- ▷ Groupe 3 : inclassables quant à sa cancérigénicité pour l'homme ;
- ▷ Groupe 4 : probablement non cancérigènes pour l'homme.

Cette classification, si elle peut être prise en compte au nom du principe de précaution, n'a pas de valeur réglementaire en France.

Les [Tableau 4](#) et [Tableau 5](#) en fin de chapitre présentent la classification CMR de l'Union Européenne (UE) et du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) pour les substances reconnues comme prioritaires pour les environnements intérieurs.

■ 1.3. Les perturbateurs endocriniens

Le corps médical ne dispose pas aujourd'hui d'outils pour mesurer les risques sanitaires liés aux perturbateurs endocriniens. Le principe fondateur de la toxicologie, « c'est la dose qui fait le poison », ne s'applique en effet pas à cette catégorie de polluants, ceci pour trois raisons (Cicollella, 2010) :



- ▷ L'importance de l'âge d'exposition et en particulier la période d'exposition *in utero* qui apparaît déterminante. Plusieurs effets sanitaires induits par l'exposition aux COSV résultent de l'exposition du fœtus dans le ventre de sa mère (Tableau 2), ce qui tend à indiquer que l'origine de l'exposition n'est pas la naissance mais la procréation. D'autres effets semblent pouvoir être reliés à l'âge auquel la personne a été exposée, ce qui conduit à affirmer que pour les perturbateurs endocriniens « la période fait le poison ».

Tableau 2 : Effet sanitaire des perturbateurs endocriniens en fonction de la fenêtre d'exposition, d'après Duval et Simonot (2010).

| | Période fœtale | Enfance | Age adulte |
|---------------------------|---|---|---|
| Système reproducteur | Malformation au niveau de l'appareil reproducteur | | Baisse de fertilité Cancers hormonaux (sein, testicules, prostate) |
| Système nerveux central | Atteinte du système nerveux central | Effets neurotoxiques Problèmes d'apprentissage Troubles du comportement | |
| Développement | Retard de croissance intra-utérin | | |
| Système respiratoire | | Allergies respiratoires | |
| Système cardio-vasculaire | | | Maladies cardio-vasculaires |
| Système immunitaire | | | Troubles de l'immunité |
| Système métabolique | | | Perturbations du métabolisme (diabète de type II, obésité) |

- ▷ La graduation des effets à la dose : avec certains perturbateurs endocriniens, on peut observer des effets à faible dose, mais pas à dose élevée, ce qui est en totale opposition avec les courbes dose-réponse habituelles qui montrent une réponse croissante avec l'augmentation de la dose.
- ▷ Le temps écoulé entre l'exposition et ses effets : les effets cliniques néfastes peuvent apparaître longtemps après que l'exposition ait cessé. Par ailleurs, les effets peuvent être transmis a posteriori aux futures générations en modifiant l'expression des gènes, entraînant des pathologies sur plusieurs générations.

Dans ce contexte, les gestionnaires sanitaires n'ont d'autres choix que l'interdiction pure et simple des substances pour lesquelles les connaissances scientifiques sur les risques sanitaires sont suffisantes, et l'application du fameux principe de précaution pour les autres substances. C'est par exemple ainsi qu'ont récemment été interdits le bisphénol A et les matériaux ou produits de consommation contenant des substances classées CMR de catégorie 1 et 2 par l'UE. C'est d'autre part en vertu du principe de précaution, et de l'information faite auprès de la population, que fleurissent désormais les mentions « sans parabènes » sur un certain nombre de produits de consommation.



2. Les indices de la Qualité de l'Air Intérieur

Un indice de QAI doit permettre de communiquer à un public non scientifique sur les niveaux de pollution de l'air intérieur, doit être corrélé aux symptômes ressentis par les occupants et peut être utilisé comme outil de gestion pour améliorer efficacement la qualité de l'air intérieur. Un recensement des indices de qualité environnementale intérieure existants a été effectué par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (Kirchner et al., 2006). Nous reprenons ici les indices spécifiques à la QAI. On citera pour mémoire :

- ▷ L'indice LHVP (Castanet, 1998) proposé par le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) qui est basé sur les niveaux de concentration ou nombres de trois polluants rapportés à des valeurs de références : le monoxyde de carbone avec son seuil de perception de la fumée de tabac (5 ppm), le dioxyde de carbone avec son seuil de confinement des locaux (1000 ppm) et le dénombrement total bactérien (DTB) avec une valeur de référence égale à 1000 ufc/m³. L'indice est la somme arithmétique directe de ces trois niveaux relatifs.
- ▷ L'indice de qualité environnemental de l'Aéroport de Paris qui est évalué à partir d'un sous-indice de confort dépendant de la température, de l'humidité de l'air et de la concentration en dioxyde de carbone et d'un sous-indice de pollution prenant en compte les concentrations en monoxyde de carbone, en dioxyde d'azote et en particules.
- ▷ L'indice CLIM 2000 (Gadeau, 1996) qui a été élaboré lors du développement du logiciel de simulation thermique dynamique CLIM 2000 par Electricité de France (EDF). L'indice global est ici l'agrégation du rapport de la concentration en polluant avec la Valeur à Risques Limités (VRL) pour laquelle une exposition au polluant a des effets sanitaires limités, voire nuls. Les polluants cibles sont le monoxyde et dioxyde de carbone, le dioxyde d'azote et le formaldéhyde.
- ▷ L'indice BILGA qui a été créé dans le cadre du développement du logiciel de simulation hygrothermique et aéraulique BILGA par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), Electricité de France (EDF), la Fédération Nationale du Bâtiment (FNB) et Gaz de France (GDF). Cet indice de qualité de l'air prend en compte les Valeurs à Risques Limités (VRL), les Valeurs à Risques Importants (VRI) et la durée d'exposition (Cohas, 1996).
- ▷ L'indice GAPI (Global Airborne Pollutant Indicator) qui a été spécifiquement développé pour le cas particulier de la qualité de l'air des salles blanches (Cariou et Guillot, 2005a) et qui prend en compte les concentrations en COV pondérées par des facteurs d'impact comme ceux influençant la qualité de fabrication des nano-technologies comme, par exemple, le volume des molécules adsorbées sur la surface des matériaux ou leur probabilité d'adsorption lors du contact. Cariou et Guillot (2005b) présentent également la possibilité de prendre en compte le risque sanitaire dans le calcul des facteurs en considérant le caractère cancérigène du polluant (groupe CMR) ou par l'occurrence des phrases de risques des fiches de l'INRS (comme le pouvoir irritant de la molécule par exemple).
- ▷ L'indice IEI (Indoor Environment Index) qui a été élaboré par Chiang et Lai (2002). Il combine des sous-indices relatifs à l'acoustique, l'éclairage, le confort thermique, les champs électromagnétiques et la qualité de l'air.
- ▷ L'indice semi-quantitatif pour l'exposition à l'humidité et aux moisissures qui a été développé par l'Institut Américain pour la Sécurité et la Santé des Usagers (NIOSH). Cet indice semi-quantitatif permet d'identifier les risques sanitaires dus à la possible présence de moisissures à partir d'une simple inspection visuelle des locaux, sans recours à la mesure qui comporte de nombreuses limitations en terme de spatialité et de temporalité (Park et al., 2004). Quatre facteurs environnementaux sont considérés ici : présence de taches d'eau, moisissures



visibles, odeurs de moisi, humidité. Sept éléments sont inspectés : plafond, murs, fenêtres, plancher, système de chauffage/ventilation/climatisation, conduites d'eau et mobilier. Pour chacun de ces éléments, un système de notation de 0 à 3 a été élaboré. Par exemple, pour les taches d'eau, 0 signifie qu'il n'y a pas de trace de taches d'eau et 3 que les taches représentent plus de 30 % de la surface. Les facteurs sont ensuite considérés individuellement ou agrégés pour déterminer un indice global d'exposition.

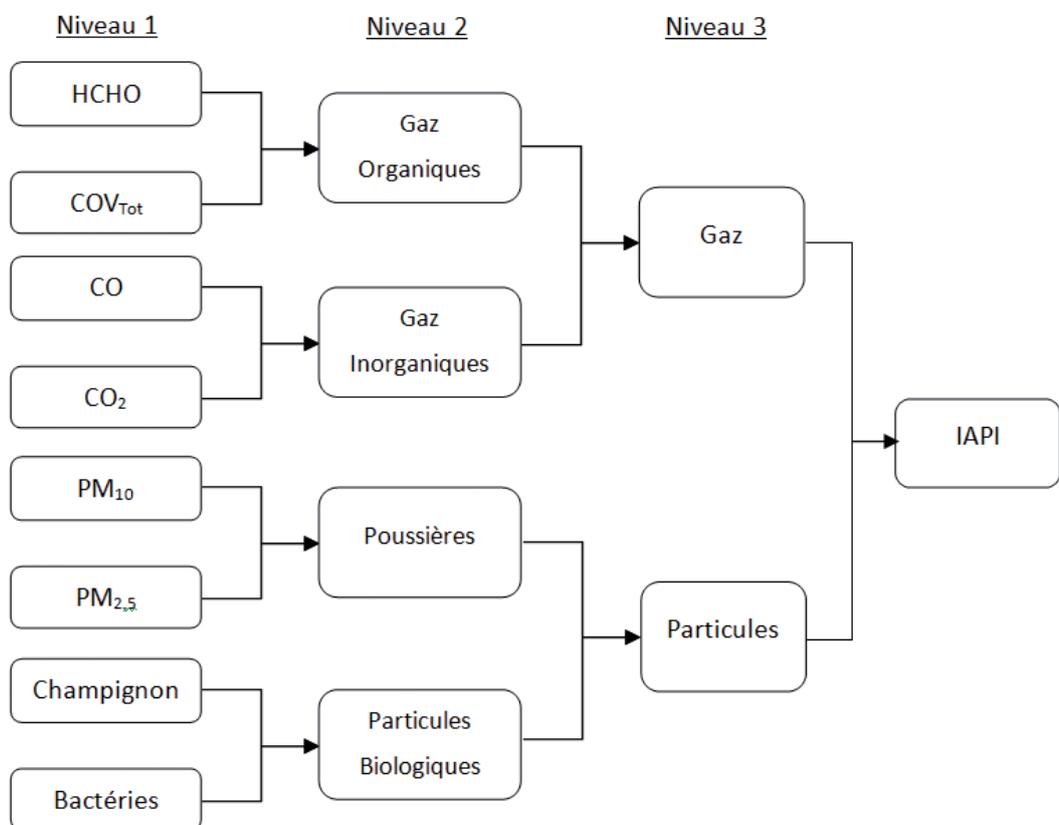
- ▷ L'indice de dommages créés par l'humidité élaboré par Haverinen et al. (2003) qui est un indice permettant d'évaluer le niveau d'humidité d'un bâtiment.

Cependant, on notera que les indices présentés ici succinctement n'ont pas été élaborés à partir de données scientifiques solides afin d'être utilisés de manière générale pour les problèmes de qualité de l'air intérieur mais plutôt afin de répondre à des besoins spécifiques et/ou à des développements de logiciels.

Contrairement à ceux-ci, l'indice IAPI (Indoor Air Pollution Index) est le seul indice de qualité de l'air intérieur multi-polluant ayant fait l'objet d'une validation sanitaire à ce jour. Cet indice, développé par Sofuoglu et Moschandreas (2003), est évalué à partir de la mesure de la concentration de 8 polluants (Figure IV.2) : monoxyde de carbone, formaldéhyde (HCHO), PM_{2,5}, PM₁₀, bactéries, champignons, CO₂ et COV totaux.

[Se reporter à l'annexe 1.](#)

Figure 2 : Structure de l'indice IAPI.



3. La hiérarchisation des polluants

Devant le nombre important de polluants de l'air intérieur, il semble raisonnable de disposer d'un indicateur permettant de classer, de hiérarchiser, les différents composés afin de pouvoir focaliser les efforts d'amélioration de la qualité de l'air sur un nombre réduit de ces polluants. On rappellera qu'aucun des polluants des environnements intérieurs ne constitue un indicateur de cette pollution à lui seul et que le traitement d'un groupe de substances bien est nécessaire.

La France, avec la création d'un groupe de travail de l'Observatoire de la Qualité de l'Air en 2002, a été précurseur dans l'élaboration d'un tel indicateur, nommé indice de hiérarchisation (IH), qui est calculé selon trois sous-indices : indice de potentiel de risque aigu (noté sur 5), indice de potentiel de risque chronique (noté sur 10) et indice de fréquence de détection à l'intérieur des logements (noté sur 5). Une première hiérarchisation a été élaborée en 2002 (et complétée en 2005) pour les substances présentes dans les environnements de type logement. Une importante mise à jour de la liste de polluants, sur laquelle le principe de hiérarchisation est appliqué, a été effectuée en 2010. Elle a permis de prendre en compte les connaissances les plus récentes sur les polluants de l'air intérieur obtenues par les travaux de l'Agence de l'Environnement du Danemark, par la mise en place du protocole de caractérisation des émissions de COV par les matériaux (ANSES, 2009), par l'utilisation de base de données concernant l'émission de polluants gazeux des matériaux de construction et de décoration et de l'activité des occupants PANDORE (Abadie et Blondeau, 2010) et par le projet de hiérarchisation Européen INDEX (INDEX, 2005).

La hiérarchisation des polluants a permis de déterminer plusieurs niveaux de priorité en fonction de l'environnement (logements, bureaux et écoles) et du mode d'exposition (inhalation ou oral), voir tableaux suivants. On notera que le formaldéhyde, le benzène, le 1,4-dichlorobenzène, l'acétaldéhyde, le toluène et les particules PM2,5 sont des substances prioritaires des logements et des bureaux pour une exposition par inhalation. On retiendra toutefois qu'un grand nombre de données d'exposition sont actuellement inexistantes pour les écoles et bureaux et que seulement 30 % des substances classées pour les logements ont pu être hiérarchisées.

Tableau 4 : Compilation des substances « hautement prioritaires » - Logements.

| Classes | Substances | Numéro CAS | Voie Prédominante | CMR selon l'UE (2012) | CMR selon Le CIRC (2012) |
|-----------------------|-------------------------|------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| Hautement Prioritaire | formaldéhyde | 50-00-0 | inhalation | C2 | 1 |
| | benzène | 71-43-2 | inhalation | C1A M1B | 1 |
| | acroléine | 107-02-8 | inhalation | | 3 |
| | cadmium | 7440-43-9 | inhalation | C1B M2 R2 | 1 |
| | benzo[a]pyrène | 50-32-8 | inhalation | C1B M1B R1B | 1 |
| | 1,4-dichlorobenzène | 106-46-7 | inhalation | C2 | 2B |
| | acétaldéhyde | 75-07-0 | inhalation | C2 | 2B |
| | PM10 | PM10 | inhalation | | |
| | PM2,5 | PM2,5 | inhalation | | |
| | di-2-éthylhexylphtalate | 117-81-7 | oral | R1B | |
| | arsenic | 7440-38-2 | oral | | 1 |
| | plomb | 7439-92-1 | oral | | 2B |
| | benzo[a]anthracène | 56-55-3 | inhalation | C1B | 2B |
| | monoxyde de carbone | 630-08-0 | inhalation | R1A | |
| | chloroforme | 67-66-3 | inhalation | C2 | 2B |

Tableau 5 : Compilation des substances « hautement prioritaires » - Bureaux.

| Classes | Substances | Numéro CAS | Voie Prédominante | CMR selon l'UE (2012) | CMR selon Le CIRC (2012) |
|-----------------------|----------------|------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| Hautement Prioritaire | benzène | 71-43-2 | inhalation | C1A M1B | 1 |
| | PM2,5 | PM2,5 | inhalation | | |
| | mélange de PCB | 1336-36-3 | inhalation | | 2A |
| | éthylbenzène | 100-41-4 | inhalation | | 2B |
| | formaldéhyde | 50-00-0 | inhalation | C2 | 1 |

Tableau 6 : Compilation des substances « hautement prioritaires » - Écoles.

| Classes | Substances | Numéro CAS | Voie Prédominante | CMR selon l'UE (2012) | CMR selon Le CIRC (2012) |
|-----------------------|--------------|------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| Hautement Prioritaire | formaldéhyde | 50-00-0 | inhalation | C2 | 1 |
| | benzène | 71-43-2 | inhalation | C1A M1B | 1 |
| | acétaldéhyde | 75-07-0 | inhalation | C2 | 2B |
| | PM10 | PM10 | inhalation | | |
| | PM2,5 | PM2,5 | inhalation | | |
| | chrome | 18540-29-9 | oral | | 1 |



Chapitre 5

La réglementation

1. La réglementation existante

■ 1.1. L'Aération et la ventilation

La réglementation concernant l'aération et la ventilation présente des exigences en termes de solutions pour assurer des débits de renouvellement d'air nécessaires au maintien d'une bonne qualité de l'air. On notera que, même si la tendance actuelle est au recours quasi-systématique à la ventilation mécanique pour assurer les débits réglementaires, aucune réglementation ne l'impose comme unique solution pour l'immobilier neuf et que par conséquent la ventilation naturelle doit toujours être considérée comme une réelle alternative.

Se reporter à l'annexe 2.

■ 1.2. L'amiante

En France, les usages de l'amiante ont été restreints progressivement à partir de 1978, pour aboutir à une interdiction générale en 1997 par le décret du 24 décembre 1996. A partir de 1996, les pouvoirs publics ont mis en place un dispositif réglementaire destiné à protéger la population exposée dans les immeubles bâtis. Ce dispositif est désormais intégré dans le Code de la Santé Publique (articles L. 1334-12 à L. 1334-17 et R. 1334-14 à R. 1334-29) et consiste à prescrire un repérage et, le cas échéant, une surveillance et/ou des travaux, en vue d'éradiquer les situations à risque et de gérer les matériaux en place qui ne génèrent pas de risques dès lors qu'ils ne sont pas dégradés. Récemment, le décret du 3 juin 2011 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis distingue trois types de matériaux répartis selon trois listes : liste A (flocages, calorifugeages et faux plafonds), liste B (Enduits, panneaux, dalles de sol, conduits, joints, revêtements durs, clapets...) et liste C (autres matériaux susceptibles de contenir de l'amiante). Les obligations des propriétaires sont décrites en cas de repérage d'amiante (Figure 2).

Le Code Du Travail a été modifié par le décret du 4 mai 2012 concernant les risques d'exposition à l'amiante avec pour date d'entrée en vigueur au 1^{er} juillet 2012 (sauf quelques articles).

Les nouvelles dispositions portent sur les employeurs et travailleurs qui réalisent des travaux de retrait ou d'encapsulation de matériaux contenant de l'amiante ou qui effectuent des interventions sur des matériaux susceptibles de provoquer l'émission de fibres d'amiante.

Le rôle du donneur d'ordre est désormais détaillé : il doit joindre les DTA et/ou repérages avant travaux aux dossiers de consultation des entreprises. Il doit également être informé par l'entreprise des dépassements de seuils réglementaires.

Une nouvelle notion importante est indiquée concernant les « processus de travail », il s'agit des techniques utilisées selon le type de matériaux amiantés et les moyens de protection mis en œuvre. L'employeur doit réaliser son évaluation des risques par processus de travail selon 3 niveaux de risque décrits dans le décret.

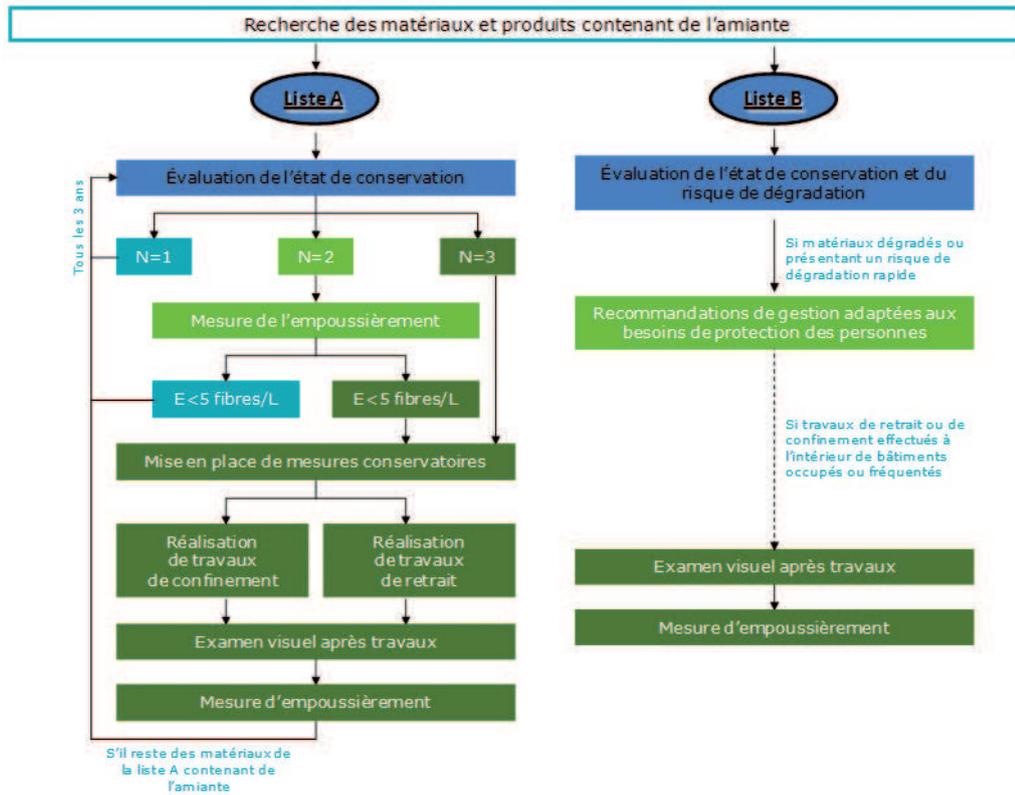
L'objectif du décret est d'imposer aux entreprises un niveau d'exposition le plus bas techniquement possible pour leurs salariés et l'environnement, ainsi apparaissent des notions telles que le travail robotisé, l'imprégnation des matériaux à cœur avec des agents mouillants...

Les zones de travail doivent indiquer par une signalétique le niveau d'empoussièrement estimé.

En cas de dépassement du seuil réglementaire du Code de la Santé Publique (5f/L) dans l'environnement du chantier, l'employeur doit stopper ses opérations, mettre en place des mesures correctives et préventives et prévenir sans délai le donneur d'ordre et le Préfet.

Les durées maximales de vacation sont également inscrites dans un paragraphe et les éléments à renseigner dans la fiche individuelle d'exposition sont indiqués avec précision.

Figure 2 : Obligations des propriétaires en cas de présence d'amiante – d'après Bonnet (2011).



■ 1.3. Le Monoxyde de Carbone

La réglementation vise à la protection de la population contre les risques liés à l'exposition au Monoxyde de Carbone dans les immeubles bâtis. Ses principes fixent des exigences lors de la définition des règles de construction, des obligations de travaux et des vérifications du fonctionnement des appareils à combustion et des installations intérieures de gaz (Tableau 6).

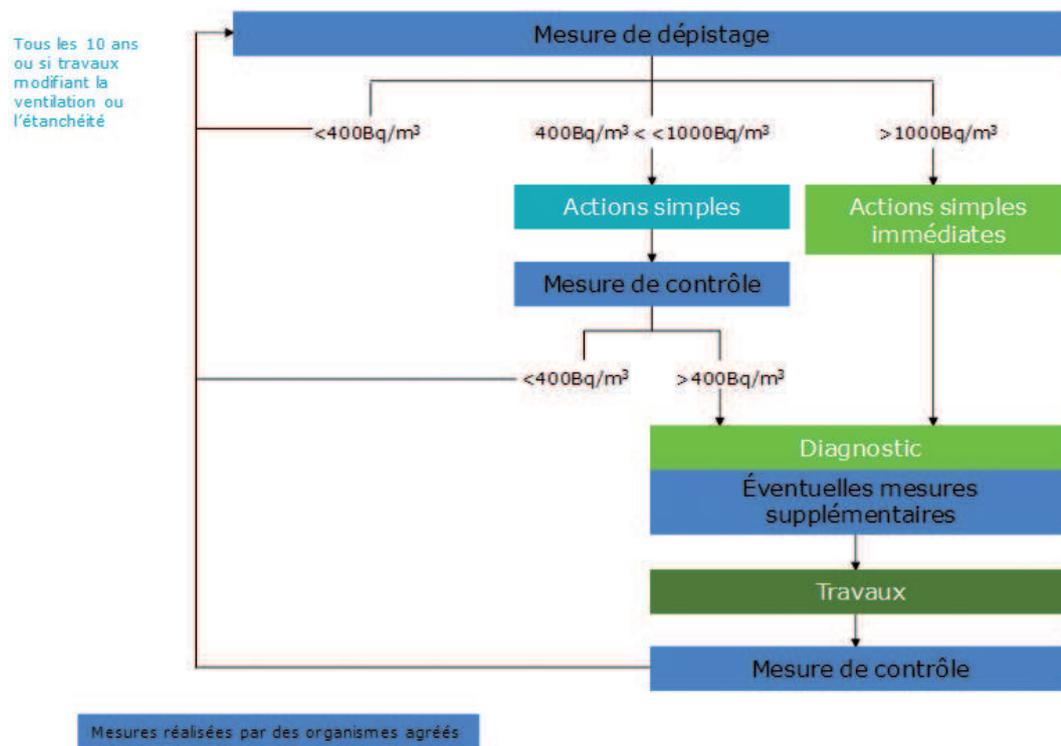
Tableau 6 : Synthèse de la réglementation concernant le Monoxyde de Carbone – d’après Bonnet (2011).

| | | Description |
|--|---|---|
| Règles de construction | Arrêté interministériel du 22 octobre 1969 | Exigences relatives aux conduits de fumée dans les logements |
| | Arrêté interministériel du 2 août 1977 | Règles techniques et de sécurité applicables aux installations de gaz combustible et d’hydrocarbures liquéfiés situés à l’intérieur des bâtiments d’habitation ou de leurs dépendances |
| | Décret du 27 novembre 2008 Arrêté d’application du 23 février 2009 | Règles spécifiques à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone |
| | Arrêté du 23 février 2009 | Concerne les locaux à usage d’habitation destinés à recevoir de façon fixe un appareil de chauffage ou de production d’eau chaude sanitaire d’une puissance ≤ 70 kW et utilisant les combustibles solides ou liquides |
| | Arrêté du 23 février 2009 | <ul style="list-style-type: none"> • Aménagement et de ventilation des locaux : amenée d’air neuf permanente et système d’évacuation des produits de combustion • Dispositions techniques applicables au système d’évacuation des produits de combustion • Dispositions à mettre en place en cas de raccordement d’appareils à un conduit de fumée existant • Entretien des amenées d’air, système d’évacuation et appareils |
| État de l’installation intérieure de gaz | Article L134-6 du Code de la Construction et de l’Habitation | <ul style="list-style-type: none"> • Exigé depuis 1^{er} novembre 2007 en cas de vente • Concerne les immeubles à usage d’habitation comportant une installation intérieure de gaz réalisée depuis plus de 15 ans • Durée de validité : 3 ans • Consiste en la description de l’état des appareils fixes de chauffage et de production d’eau chaude sanitaire, des tuyauteries fixes d’alimentation en gaz, de leurs accessoires et de l’aménagement des locaux où fonctionnent les appareils à gaz |
| Entretien annuel des chaudières | Arrêté du 15 septembre 2009 | <ul style="list-style-type: none"> • Applicable depuis le 31 octobre 2009 • À toutes les chaudières (Gaz, fioul, biomasse, multi-combustibles) dont la puissance est comprise entre 4 et 400 kW • L’opération comprend la vérification de la chaudière et, si nécessaire, son nettoyage et son réglage, une mesure du taux de CO, une évaluation des performances énergétiques et environnementales de la chaudière et des conseils |

■ 1.4 Le radon

La réglementation vise à la protection de la population contre les risques liés à l’exposition au radon dans les immeubles bâtis en fixant des obligations de surveillance et en présentant des préconisations adaptées. L’arrêté du 22 juillet 2004 spécifie les modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Ces modalités sont obligatoires pour quatre catégories de lieux ouverts au public (établissements d’enseignement, y compris les bâtiments d’internat, établissements sanitaires et sociaux disposant d’une capacité d’hébergement, établissements

Figure 4 : Principe de la gestion du risque au radon - Bonnet (2011).



■ 1.5 L'étiquetage des produits de construction et de décoration

Note préliminaire : les produits de construction et de décoration ne peuvent être mis sur le marché que s'ils émettent des quantités négligeables de Trichloréthylène (CAS 79-01-6), de Benzène (CAS 71-43-2), de Phtalate de bis (2-éthylhexyle) (CAS 117-81-7) ou de Phtalate de dibutyle (CAS 84-74-2).

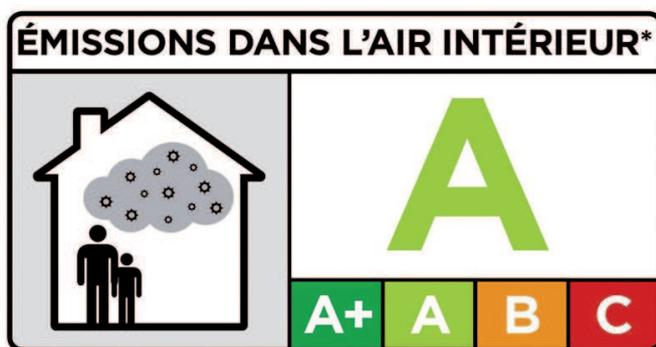
Les textes réglementaires fondateurs relatifs à l'étiquetage des produits de construction et de décoration sont les articles 40 de Loi Grenelle 1 du 3 août 2009 et 180 de la Loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 qui ont donné lieu à l'article L. 221-10 du Code de l'Environnement stipulant que les produits de construction et d'ameublement ainsi que les revêtements muraux et de sol, les peintures et vernis qui émettent des substances dans l'air ambiant sont soumis à une obligation d'étiquetage des polluants volatils à partir du 1^{er} janvier 2012. Le décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 a ensuite fixé les conditions d'étiquetage de ces produits sur leurs émissions de polluants volatils. Les nouvelles dispositions font l'objet des articles R. 221-22 à R. 221-28 du Code de l'environnement. Enfin, l'arrêté d'application du 19 avril 2011 précise les modalités de présentation de l'étiquette et la liste des polluants volatils.

Les substances composant la liste définie à l'article R. 221-27 du Code de l'Environnement ainsi que les seuils limites de concentrations d'exposition sont listés dans le [Tableau 7](#). Les concentrations d'exposition sont calculées pour une pièce de référence conventionnelle d'un volume total de 30 m³, à l'intérieur de laquelle on applique un taux de renouvellement de l'air de 0,5 vol/h et une surface de matériau émissif conforme à son utilisation. Les taux d'émission de ces matériaux sont préalablement mesurés en chambre expérimentale selon le protocole décrit par la norme NF ISO 16000 (-3 et -6 pour les substances considérées pour l'étiquetage). Les classes d'émission sont établies sur la base de mesures réalisées après vingt-huit jours en chambre ou en cellule d'essai d'émission, ou avant ce délai si les émissions respectent les exigences de la classe des émissions les plus faibles (A+). L'étiquette prévue à l'article R. 221-24 du Code de l'Environnement ([Figure 5](#)) présente le niveau d'émission sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions) qui est basé sur la classe la plus défavorable (celle du Toluène dans l'exemple du [Tableau 7](#)).

Tableau 7 : Seuils limites des concentrations d'exposition ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et classes correspondantes (exemple d'un matériau, classé A, pour lequel les mesures ont donné des niveaux de concentration selon les cases colorées).

| CLASSES | C | B | A | A+ |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Formaldéhyde | > 120 | < 120 | < 60 | < 10 |
| Acétaldéhyde | > 400 | < 400 | < 300 | < 200 |
| Toluène | > 600 | < 600 | < 450 | < 300 |
| Tétrachloroéthylène | > 500 | < 500 | < 350 | < 250 |
| Xylène | > 400 | < 400 | < 300 | < 200 |
| 1,2,4-Triméthylbenzène | > 2000 | < 2000 | < 1500 | < 1000 |
| 1,4-Dichlorobenzène | > 120 | < 120 | < 90 | < 60 |
| Ethylbenzène | > 1500 | < 1500 | < 1000 | < 750 |
| 2-Butoxyéthanol | > 2000 | < 2000 | < 1500 | < 1000 |
| Styrène | > 500 | < 500 | < 350 | < 250 |
| COVT | > 2000 | < 2000 | < 1500 | < 1000 |

Figure 5 : Étiquette des produits de construction et de décoration sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation.



2. Les évolutions prévues

■ 2.1 Les valeurs-guides pour l'air intérieur

L'article L. 221-1 du Code de l'Environnement prévoit de fixer par décret en Conseil d'État une liste des substances à surveiller ainsi que les normes de qualité de l'air dans les communes incluses dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants.

À ce jour, seul le décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur (VGAI) pour le formaldéhyde et le benzène est paru. Le décret précise d'abord la définition de la valeur-guide pour l'air intérieur qui est un niveau de concentration de polluants dans l'air intérieur fixé, pour un espace clos donné, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine, à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné. Les VGAI pour le formaldéhyde et le benzène sont présentées dans le [Tableau 8](#).

Tableau 8 : Valeurs-guides pour l'air intérieur (VGAI) pour le formaldéhyde et le benzène.

| Substances | Chemical Abstracts Service (CAS) | Valeurs-guides pour l'air intérieur | |
|--------------|----------------------------------|--|--|
| | | | |
| Formaldéhyde | 50-00-0 | 30 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2015 | 10 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2023 |
| Benzène | 71-43-2 | 5 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2013 | 2 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2016 |

■ 2.2 La surveillance de la QAI

L'article L. 221-8 du Code de l'Environnement stipule qu'une surveillance de la qualité de l'air intérieur sera obligatoire pour le propriétaire ou l'exploitant de certains établissements recevant du public lorsque la configuration des locaux ou la nature du public le justifie. La mise en œuvre de cette surveillance et la mise à disposition de ses résultats auprès du public seront assurées à leurs frais par les propriétaires ou les exploitants de ces espaces clos. Le décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public précise les établissements concernés, les dates d'application (Tableau 9) et les grands principes de la surveillance. La surveillance de la qualité de l'air intérieur comportera une évaluation des moyens d'aération des bâtiments et une campagne de mesure de polluants. Cette surveillance sera à renouveler dans les sept ans suivant la réception des résultats de mesure de la précédente campagne de surveillance, sauf lorsqu'au moins pour un polluant le résultat des analyses effectuées dépassera la valeur-guide pour l'air intérieur (VGAI). Dans ce dernier cas, le propriétaire ou, le cas échéant, l'exploitant de l'établissement concerné engagera à ses frais toute expertise nécessaire pour identifier les causes de présence de pollution dans l'établissement et fournir les éléments nécessaires au choix de mesures correctives pérennes et adaptées à la pollution. La surveillance de l'établissement sera alors à renouveler dans un délai de deux ans.

Tableau 9 : Établissements concernés par la surveillance de la QAI et dates d'application.

| Établissements | Dates d'application |
|--|---------------------------------------|
| Établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans et les écoles maternelles | avant le 1 ^{er} janvier 2015 |
| Écoles élémentaires | avant le 1 ^{er} janvier 2018 |
| Accueils de loisirs et les établissements d'enseignement du second degré | avant le 1 ^{er} janvier 2020 |
| Autres établissements (sanitaires et sociaux, pénitentiaires pour mineurs, piscines couvertes) | avant le 1 ^{er} janvier 2023 |

Enfin le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public précise les conditions de surveillance dans les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans, les écoles maternelles et élémentaires, les établissements d'enseignement ou de formation professionnelle du second degré et les accueils de loisirs. Doivent être mesurés le formaldéhyde, substance irritante pour le nez et les voies respiratoires, émise par certains matériaux de construction, le mobilier, certaines colles, les produits d'entretien..., le benzène, substance cancérigène issue notamment de la combustion, et le dioxyde de carbone (CO₂), sans effet notable sur la santé mais représentatif du niveau de confinement des locaux. L'état des moyens d'aération des bâtiments sera également évalué par un organisme accrédité.



■ 2.3. Un regard vers la réglementation à l'échelle internationale

La ventilation

Le débit volumique d'air de ventilation est spécifié de nombreuses façons différentes dans les réglementations et normes des différents pays (fonction du nombre d'occupants et/ou de la surface et/ou du volume du local) et il n'est pas possible d'établir un tableau simple avec des catégories qui couvrent toutes les exigences et options très variables. Cependant, une récente étude (Brelvi et Seppänen, 2011) a permis de comparer les taux de renouvellement de l'air intérieur de locaux – types (logement et bureau) européens. Les résultats montrent que les débits d'air neuf réglementaires sont inconsistants et très hétérogènes au niveau de l'Europe. Ainsi, pour un même logement, les taux de renouvellement d'air s'étendent de 0,23 /h pour la Bulgarie, 0,48 /h pour la France, la Roumanie et la Norvège et jusqu'à 1,21 /h pour les Pays-Bas. Pour un bureau avec un occupant, les débits d'air extraits varient de 25 m³/h pour la Pologne, la Roumanie, la France à 90 m³/h pour l'Allemagne et la Hongrie.

La surveillance de la QAI

Dès les années 1970, le Japon adopte une loi sur l'hygiène et la salubrité des bâtiments (Rousselle *et al.*, 2011). Cette loi s'applique à tout bâtiment comportant une surface de locaux commerciaux supérieure à 3000 m² et aux écoles de plus de 8000 m². Elle impose une surveillance de la qualité de l'air intérieur par mesure des concentrations en monoxyde et dioxyde de carbone, en particules et en formaldéhyde. Ces mesures doivent être effectuées tous les deux mois et comparées à des valeurs-guides, sauf pour le formaldéhyde pour lequel les mesures sont uniquement effectuées à la livraison du bâtiment ou après une réhabilitation. En 2000, un comité d'experts a complété la liste de composés organiques volatils à surveiller en ajoutant 13 substances dont le toluène, les xylènes, l'acétaldéhyde et le styrène. Ces composés ont été choisis en fonction des valeurs-guides proposées par l'OMS, par l'observation de concentrations supérieures à l'intérieur des bâtiments, de leur occurrence dans les matériaux de constructions. On remarquera que la mesure de COVT est également présente dans la surveillance mais celle-ci est considérée comme un indicateur de la pollution de l'air et non pas comme une valeur sanitaire en tant que telle.

Avec l'établissement du Diagnostic de Performance Énergétique des bâtiments en 2006 (avec application pour l'ensemble des bâtiments recevant du public en 2009), le Portugal a également rendu obligatoire la surveillance de la QAI par vérification des niveaux de concentrations en particules, monoxyde et dioxyde de carbone, ozone, formaldéhyde, COV totaux, microorganismes (bactéries et champignons) ainsi des légionnelles et du radon si nécessaires. Ses mesures font partie intégrale du « certificat énergétique et de qualité de l'air » dont la partie relative à la QAI est présentée par la [Figure 6](#).



Figure 6 : Extrait du certificat énergétique et de qualité de l'air du Portugal.

 CERTIFICADO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR | Nº CER 1234567/2007

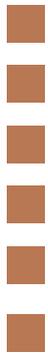
Nº do perito qualificado _____ Data de emissão _____ Data de validade _____

13. CONCENTRAÇÕES DOS PRINCIPAIS POLUENTES NO AR INTERIOR (MEDIDOS EM AUDITORIA)

| Descrição sucinta da metodologia utilizada, observações, resultados e conclusões | Data da auditoria _____ | |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
| • | | |
| Valores verificados em auditoria para os principais parâmetros e poluentes | Concentração Medida | Concentração máxima De referência |
| Partículas suspensas no ar com diâmetro inferior a 10 microns (PM ₁₀) | mg/m ³ | 0,15 mg/m ³ |
| Dióxido de carbono | mg/m ³ | 1800 mg/m ³ |
| Monóxido de carbono | mg/m ³ | 12,5 mg/m ³ |
| Ozono | mg/m ³ | 0,2 mg/m ³ |
| Formaldeído | mg/m ³ | 0,1 mg/m ³ |
| Compostos Orgânicos Voláteis Totais | mg/m ³ | 0,6 mg/m ³ |
| Microrganismos – bactérias | UFC/m ³ | 500 UFC/m ³ |
| Microrganismos – fungos | UFC/m ³ | 500 UFC/m ³ |
| <i>Legionella</i> | UFC/l | 100 UFC/l |
| Radão | Bq/m ³ | 400 Bq/m ³ |

Sugestões de medidas de melhoria associadas

Proposta n _____



Chapitre 6

La métrologie

La métrologie des polluants intérieurs est en perpétuel renouvellement ou évolution depuis que les problématiques de qualité de l'air ont été étudiées et développées. Ainsi, la présentation ci-après des outils métrologiques disponibles ne sera pas exhaustive mais permettra d'éclairer les options disponibles quant à la stratégie à utiliser pour effectuer un suivi de la QAI dans un bâtiment.

1. Les polluants gazeux radioactifs

Plusieurs stratégies de mesures du **radon** sont envisageables dans les bâtiments (<http://www.irsn.fr>) :

- ▷ **Mesure ponctuelle** : le prélèvement est effectué sur une courte durée (inférieure à une heure) en un point donné de l'espace et en une analyse (par exemple un comptage) réalisée simultanément ou après un délai déterminé.
- ▷ **Mesure intégrée** : la mesure consiste en une accumulation au cours du temps de grandeurs physiques (nombre de traces nucléaires, nombre de charges électriques, etc.), liées à la désintégration du radon et/ou de ses descendants et en une analyse réalisée à l'issue de la période d'accumulation. Une durée de mesure minimale d'une semaine est nécessaire afin d'inclure un nombre minimum de cycles de variation journalière.
- ▷ **Mesure en continu** : la mesure consiste en un prélèvement effectué de façon continue (ou par pas d'intégration inférieur ou égal à l'heure) et en une analyse réalisée simultanément ou en léger différé. Afin de suivre l'évolution temporelle de l'activité volumique du radon la durée de l'investigation doit être adaptée à la dynamique du phénomène étudié.

La mesure doit être représentative de la valeur moyenne annuelle pour que ce résultat puisse être comparable aux niveaux d'action réglementaires. De manière générale, la mesure de la concentration en radon dans l'air des pièces occupées du bâtiment est effectuée de manière « intégrée » (sur au moins deux mois), en utilisant un « dosimètre ». Cet appareil mesure la concentration de radon présente dans la pièce, pendant toute la période où il y a été déposé. Les particules alpha émises par le Radon heurtent le film du dosimètre et chaque impact sur le film sera ensuite révélé grâce à un procédé chimique (voir norme AFNOR NF M 60).

2. Les polluants gazeux inorganiques

■ 2.1. Le dioxyde de carbone

Actuellement, les détecteurs utilisés pour la mesure de la teneur en CO₂ utilisent la technologie infrarouge non-dispersive (NDIR). Cependant, un outil plus pertinent qu'une mesure ponctuelle de la teneur en CO₂ a été étudié pour également tenir compte de la fréquence de cette teneur.

En effet, le CO₂ est utilisé comme indicateur du confinement d'une pièce puisqu'en l'absence de source de combustion, la respiration en est la source principale. L'approche de la gestion du confinement a déjà été abordée par le CSTB avec le développement du boîtier LUM'AIR® (<http://www.oqai.fr>). Cet outil se réfère à la mesure d'un indice de confinement de l'air (ICONE). Cet indice tient compte de la fréquence et de la concentration en CO₂ dans une pièce selon un système de notes comprises entre 1 et 5 ; la note 0 correspondant à un confinement nul (concentration en CO₂ < 1000 ppm 100 % du temps) et 5 à une situation de confinement extrême (concentration en CO₂ < 5000 ppm 100 % du temps).



LUM'AIR® est un outil d'action immédiate ; il fournit une information suffisamment précise pour guider l'occupant vers un comportement d'aération plus efficace.

■ 2.2. Le monoxyde de carbone

Deux techniques principales permettent de mesurer la concentration en CO : les capteurs électrochimiques et le rayonnement infrarouge. La mesure de la concentration en CO pour la surveillance dans les environnements intérieurs se base sur l'utilisation d'un appareil portable à détection directe par capteur électrochimique et enregistrement (normes NF EN 45544, celle-ci s'applique aux atmosphères des lieux de travail, mais peut correspondre au cas de l'air intérieur). Un autre principe de mesure basé sur le rayonnement infrarouge non-dispersif est également disponible (norme NF EN 14626) mais ce type d'instrument reste difficile à mettre en œuvre dans les environnements intérieurs.

■ 2.3. Les oxydes d'azote

Les concentrations en oxydes d'azote peuvent être évaluées selon les principes suivants :

- ▷ **La colorimétrie** : il s'agit d'une méthode simple qui repose sur le principe de coloration d'une solution dite de Saltzman suite à une réaction de barbotage de l'air. La solution devenant rose-violacé de façon plus ou moins intense selon la concentration en NOx. Cette méthode peut toutefois manquer de précision mais qui peut être améliorée en utilisant un spectrophotomètre (Evaluation des performances métrologiques des appareils de mesure spécifiques de l'air intérieur, Rapport INERIS pour le LCSQA, 2008).
- ▷ **La spectrométrie infrarouge** : un spectrophotomètre infrarouge est un instrument permettant de faire passer de la lumière infrarouge au travers des molécules organiques qui vont l'absorber selon des longueurs d'onde bien précises pour chacune d'entre elles. Cette mesure représente la longueur d'onde et l'intensité de la lumière infrarouge (IR) moyenne absorbée par un échantillon. On peut ainsi obtenir une information qualitative mais également quantitative puisque fonction de l'intensité du rayonnement IR absorbé.
- ▷ **La chimiluminescence** : la chimiluminescence est un phénomène par lequel certaines molécules après avoir été excitées retournent à un état fondamental en dégageant de l'énergie sous forme d'émission de lumière. Le phénomène utilisé ici est la chimiluminescence du monoxyde d'azote avec l'ozone. C'est aujourd'hui la technique la plus employée pour les mesures d'oxydes d'azote (norme européenne NF EN 14211). Un échantillon à analyser contient une certaine quantité de monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote. L'échantillon est séparé en deux parties homogènes et de même volume pour être analysées de la manière suivante :
 - **Mesure du NO** : le premier volume est envoyé dans une chambre à réaction où il est mélangé à de l'ozone présent en excès. Le rayonnement produit est mesuré par un photomultiplicateur et donne ainsi la concentration [NO] de l'échantillon initial.
 - **Mesure du NO₂** : le second volume est envoyé dans un four à catalyse en molybdène chauffé à haute température pour réduire tous les oxydes d'azote en NO. Le rayonnement émis est maintenant proportionnel à la quantité totale d'oxydes d'azote NOx et l'on peut ainsi déterminer la concentration en NO₂ ($[NO_2] = [NOx] - [NO]$).

■ 2.4. L'ozone

On peut mesurer les concentrations en ozone selon les méthodes suivantes :

- ▷ **Méthode colorimétrique** : c'est la méthode la plus simple et la moins coûteuse mais également la moins précise. On fait passer l'échantillon d'air à analyser dans un tube contenant un réactif à l'ozone (réactif dipropyl-p-phénylènediamine ; DPD), la concentration étant donnée par une échelle colorimétrique.

- ▷ **Système de capteurs à semi-conducteur** : ces appareils utilisent un matériau semi-conducteur dont les caractéristiques électriques varient en fonction de la concentration d'ozone dans l'air.
- ▷ **Analyseur d'ozone** : les analyseurs d'ozone calculent la concentration d'ozone dans l'air à l'aide de la loi de Beer-Lambert qui détermine la concentration d'ozone en fonction de l'absorption du rayonnement UV. Ces appareils, extrêmement coûteux par rapport aux autres systèmes, présentent de nombreux avantages comme une grande précision, aucune interférence avec d'autres éléments, une réponse très rapide et aucun consommable à prévoir.

3. Les polluants gazeux organiques

Plus de 500 composés organiques peuvent être décelés à l'intérieur des bâtiments et bon nombre de ces polluants sont des irritants et des allergisants (Meininghaus et al., 2003). Il a ainsi pu être observé des cas d'effets sanitaires chroniques (Farrow A., et al., 2003) ou aigus qui expliquent la recherche de mise en place d'une classification ou plus précisément une hiérarchisation prenant en compte leur prévalence et leur risque sur la santé.

Dans les bâtiments, les concentrations en COV dépassent rarement 20 mg/m³ en moyenne et la concentration peut souvent être inférieure à 1 µg/m³ (Lévesque B., 2003). Ainsi, les faibles teneurs en composés chimique sont rarement compatibles avec les limites de détections des appareils analytiques usuellement utilisés en chimie analytique. Il est alors nécessaire de procéder à une phase de préconcentration des composés sur des matrices adsorbantes ou absorbantes. C'est lors de la phase d'échantillonnage que cette préconcentration est généralement réalisée. De plus, la multitude de familles chimiques rencontrées dans les ambiances intérieures imposent également des techniques séparatives en amont des techniques analytiques qualitatives et/ou quantitatives.

■ 3.1. Les aldéhydes

Dans le cas des mesures ponctuelles et intégrées, on distingue deux méthodes :

- ▷ Méthode de dérivation normalisée : la norme ISO 16000-3 spécifie une méthode de dosage spécifique du formaldéhyde (HCHO) qui peut être modifiée afin de détecter et de quantifier d'autres composés carbonyles (aldéhydes et cétones) dans l'air. La plage de concentration de ce type de dosage est comprise entre environ 1 pg/m³ et 1 mg/m³. Cette méthode d'échantillonnage fournit un résultat moyen pondéré dans le temps, ce qui permet de se placer dans des conditions d'exposition à long terme de 1 h à 24 h ou à court terme de 5 min à 60 min. Le piégeage du formaldéhyde et des autres composés carbonyles s'effectue via des cartouches imprégnées de 2,4-dinitrophénylhydrazine (DNPH) qu'une analyse ultérieure en laboratoire par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) avec détection par absorption ultraviolette permet de quantifier. A noter que les composés carbonyles à plus longues chaînes ou insaturés ne peuvent être déterminés par cette technique mais peuvent être prélevés et analysés grâce aux techniques usuellement utilisées pour les autres familles de COV.
- ▷ Autres méthodes de dérivation : ces autres méthodologies peuvent permettre la mise en place de prélèvements passifs et une dérivation par le O-(4-cyano-2-ethoxybenzyl)hydroxylamine (Onishi et al., 2007) ou bien en utilisant la 2.3.4.5.6-PentaFluoroBenzylHydroxylAmine (Koziel et al., 2001). D'autres types de dérivation rendent possible la quantification du formaldéhyde par des techniques analytiques telles que la spectrofluorométrie (dérivation par le fluorol P, Pinheiro et al., 2004), la chromatographie en phase gazeuse (dérivation par le 2-(hydroxyméthyl)piperidine, OSHA, 1989 ; Sai Hang Ho et al., 2002).



En ce qui concerne les mesures en continu, de nouvelles techniques analytiques en continu et transportables ont été développées comme l'AEROLASER, l'INTERSCAN, l'AIRMO-HCHO. Cependant, il est important de remarquer que chacune de ces techniques possède des avantages et des inconvénients pour des analyses sur site. Ainsi, d'autres types d'appareillage facilement transportable sont en cours de développement. Comme par exemple l'outil de mesure in situ en temps réel développé par le Laboratoire des Matériaux, Surfaces et Procédés pour la Catalyse (LMSPC), permettant une mesure très fine et sélective des concentrations de formaldéhyde dans l'air.

■ 3.2. Les composés organiques volatils

Mesures ponctuelles et intégrées :

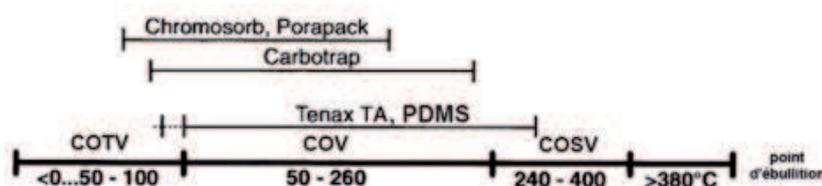
La méthodologie d'analyse décrite dans la norme ISO 16000-5 a pour but d'apporter une aide lors de la planification des mesures de la pollution de l'air intérieur par des composés organiques volatils (COV). Une stratégie de contrôle inappropriée peut contribuer à une incertitude générale des résultats plus grande que celle liée à la mesure elle-même.

La norme ISO 16000-6 spécifie une méthode permettant de doser les composés organiques volatils (COV) dans l'air échantillonné afin de déterminer la teneur en COV. La méthode utilise du sorbant Tenax TA puis une désorption thermique et une analyse par chromatographie en phase gazeuse couplé avec un détecteur à ionisation de flamme et/ou détecteur à spectrométrie de masse. La méthode s'applique à la mesure des COV apolaires et légèrement polaires pour des concentrations allant de quelques ng/m^3 à plusieurs mg/m^3 . À l'aide des principes spécifiés dans ce type de méthode, certains composés très volatils et semi-volatils peuvent également être analysés.

La norme ISO 16017-2 reprend l'échantillonnage et l'analyse des composés organiques volatils par tube à adsorption/désorption thermique/chromatographie en phase gazeuse sur capillaire. Cette norme est applicable à la mesure des teneurs en COV sur une étendue de concentration des composés individuels comprise entre $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $100 \text{mg}/\text{m}^3$ environ pour une durée d'exposition de 8 h, ou une étendue de concentration en masse des composés organiques individuels comprise entre $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $300 \text{mg}/\text{m}^3$ pour une durée d'exposition de quatre semaines.

La limite inférieure de l'étendue utile dépend du niveau de bruit de fond du détecteur et des niveaux à blanc de l'analyse et/ou des artefacts d'interférences sur les tubes à adsorption. Ces artefacts sont généralement d'un ordre inférieur au nanogramme pour les Tenax GR correctement étalonnés et pour les adsorbants carbonés tels que les matériaux de type Carbotrap/Carbotrap, pour les tamis moléculaires carbonés tels que le Spherocarb et pour les charbons purs ; ils sont de l'ordre du nanogramme pour le Tenax TA et de 5 ng à 50 ng pour les autres polymères poreux tels que les Chromosorbs et les Porapak.

Figure 1 : Classement des COV selon leur point d'ébullition et adsorbants appropriés (Cozic, 2004).



À noter que les matériaux adsorbants ou absorbants, évoqués ci-dessus, peuvent être utilisés pour des prélèvements en mode actif et passif. Un échantillonnage actif sera plutôt considéré comme représentatif d'une mesure ponctuelle par comparaison à l'échantillonnage passif qui rendra compte d'une mesure intégrée sur le long terme. De même, un échantillonnage au moyen de canisters ou sacs inertes peuvent rendre compte d'une mesure ponctuelle ou intégrée selon le débit de prélèvement appliqué.



Mesures en continu :

La grande limite d'un suivi en continu des concentrations dans l'air intérieur des COV provient de la multiplicité du nombre de COV potentiellement présents et de leur faible teneur.

De par la complexité de ces mesures, le nombre d'analyseurs on-line reste faible même si le développement de ceux-ci est en pleine expansion. Ainsi, depuis quelques années déjà des chromatographes ont été adaptés à une utilisation sur le terrain en intégrant de manière automatique la prise d'échantillon, le piégeage des COV, l'analyse et l'intégration des chromatogrammes. Ce type de suivi en continu n'est cependant pas encore adapté à un contrôle sur l'ensemble de la famille des COV.

De nouvelles solutions d'analyses on-line sont récemment utilisées avec notamment l'utilisation de la spectrométrie de masse à réaction de transfert de proton (PTR-MS). Cette technologie permet une quantification de COV à des concentrations de l'ordre du nanogramme.

L'utilisation de capteurs à semi-conducteur est une voie de développement recherchée de par son faible coût d'utilisation. Cependant, cette technologie n'est pas actuellement en mesure de donner une réponse discriminante sur l'ensemble des COV présents. De plus, il est souvent difficile d'utiliser ces capteurs pour des faibles teneurs de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les biocapteurs sont également en plein développement car ils peuvent être utilisés pour le suivi d'un composé spécifique ou encore de famille de polluants. Cependant, toute la gamme des COV n'est pas encore entièrement couverte et le coût élevé de cette technologie apporte des freins à leur utilisation en air intérieur.

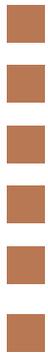
■ 3.3. Les composés organiques semi-volatils

Les composés organiques semi-volatils se trouvent à la croisée de différentes phases physiques (gazeux, particulaires et poussières), ce qui rend complexe d'un point de vue métrologique la détermination des concentrations d'exposition des personnes dans les milieux intérieurs.

Ainsi, de récentes études ont été effectuées pour déterminer la distribution de ses COSV dans les milieux intérieurs (ECOS-Ecole, ECOS'PER), d'autres par exemple, recherchent la faisabilité d'une analyse « classique » (thermodésorption couplée à la GC/MS) pour l'analyse de filtres ayant adsorbé des particules (COSV/PM).

Des normes ont déjà été élaborées pour spécifier l'échantillonnage et la préparation des supports d'échantillonnage dans l'air intérieur, des polychlorobiphényles (PCB), des polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et des polychlorodibenzofuranes (PCDF). La méthode ISO 16000-13:2008 intègre un mode opératoire dans lequel les PCB et les PCDD/PCDF sont prélevés dans l'air sur un filtre à fines particules muni d'un piège adsorbant. Cette méthode ne permet pas de séparer les composés organiques semi-volatils présents dans la phase gazeuse et ceux liés aux particules car certains composés peuvent s'évaporer du filtre et être piégés par l'adsorbant. Une seconde norme (ISO 16000-14:2009) spécifie les modes opératoires d'extraction, de purification, et d'analyse pour ces composés organiques semi-volatils prélevés dans l'air intérieur sur des filtres à particules garnis de mousse en polyuréthane (PUF). La méthode intègre des analyses spécifiques par chromatographie en phase gazeuse haute résolution combinée à la spectrométrie de masse haute résolution (HRGC/HRMS). Cette méthode est capable de détecter des concentrations de $0,2 \text{ pg}/\text{m}^3$ ou moins pour certains COSV, mais nécessite des volumes d'air prélevés importants atteignant 360 m^3 ou plus dans certains cas mais l'incertitude rencontrée par ce type de mesures reste bien trop importante.

Une étude récente, pas encore publiée, a visé à élaborer, tester et valider les méthodes d'analyse des phtalates, pesticides et autres composés prioritaires dans les poussières d'habitation. Le but de ce type de travail était de déterminer les composés pour lesquels la méthode d'analyse des poussières prélevées au moyen d'une lingette est suffisamment sensible au regard des niveaux de contamination des logements français (ECOS-Habitat).



4. Les polluants particuliers

La répartition granulométrique des particules et l'information recherchée (taille, nombre, composition chimique) dictent le choix de la métrologie à adopter.

■ 4.1. Les particules et nanoparticules

Les nanoparticules

Différents types d'appareillages sont disponibles selon la mesure recherchée et fonction de la taille des particules. Les particules fines et ultrafines, appartenant à l'échelle granulométrique du nanomètre, nécessitent un prétraitement d'accroissement de leur taille grâce à un solvant organique. Ce solvant vient englober la nanoparticule de manière à ce que la taille de ce nouveau complexe soit détectable par le compteur de particules (compteur de particules à condensation ou compteur de noyaux de condensation). Ce type de procédé permet d'obtenir une mesure directe de la taille et du nombre de nanoparticules. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir une mesure en masse précise de ses particules car, dans le cas où cette donnée est accessible, elle est en réalité corrigée par un coefficient moyenné selon les densités des particules rencontrées en air intérieur.

D'autres méthodologies sont tout de même utilisables pour une mesure de la masse et de la distribution granulométrique. Par exemple, l'utilisation d'impacteurs en cascade peut permettre d'obtenir ses données bien que l'analyse de chaque filtre puisse être coûteuse en temps.

Tableau 1 : Exemples d'appareils de mesures en taille et/ou nombre des nanoparticules

| Appareil | Constructeur |
|-----------|--------------|
| NanoCheck | GRIMM |
| NanoScan | TSI |
| SMPS | TSI |
| CPC | TSI |
| CPC | KANOMAX |

Les particules

Un nombre plus important d'appareils analytiques sont disponibles sur le marché des analyseurs de particules. La technique est effectivement plus aisée que pour l'analyse des nanoparticules et les concentrations en particules de l'ordre du $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont également surveillées depuis bien plus longtemps.

Tout d'abord la surveillance de ses polluants est déjà effective et règlementée avec les mesures de suivi réalisées en air ambiant. Notamment le suivi des concentrations en masse des particules avec l'utilisation de microbalances très sensibles aux faibles variations, mais qui ne permet pas toujours de discerner de très faibles variations ponctuelles. Ces microbalances appelées TEOM sont principalement utilisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air ambiant. D'autres méthodes de mesures dites classiques peuvent être utilisées (jauge β , préleveur) mais ces méthodes restent inappropriées pour une utilisation en espaces réduits, pour des études multipoints ou préliminaires par exemple.

Dans les milieux intérieurs, il est important de pouvoir obtenir une information en temps réel sur une répartition granulométrique fine et le nombre de particules. En effet, cela permet de rendre de compte de manière plus précise de la dynamique particulaire. Des appareils répondant à ces spécificités existent sur le marché selon le principe physique d'une mesure par méthode optique. Deux techniques sont utilisées :

- ▷ Mesure de l'intensité de lumière diffusée par une particule passant dans un faisceau lumineux (lumière blanche ou monochromatique). L'intensité est ici de la taille de la particule.
- ▷ Mesure de la dispersion de la lumière par un flux de particules. Ceci permet d'attribuer un diamètre optique moyen à l'aérosol et donc d'obtenir une proportionnalité entre l'intensité mesurée et la concentration en nombre de particules.

Le tableau ci-dessous rassemble des exemples d'appareils optiques présents sur le marché.

Tableau 2 : Exemples d'appareils de mesures en taille, nombre ou masse des particules.

| Appareil | Constructeur |
|-----------------------|--------------|
| Microdust Pro | CASELLA CEL |
| Dusttrak | TSI |
| Sidepak | TSI |
| Aerotrak | TSI |
| CPC | TSI |
| Grimm (1.108-1.109) | GRIMM |
| ρDR-1000AN | THERMO |
| ρDR-1500 | THERMO |
| DataRAM 4 | THERMO |
| Osiris | TURNKEY |
| DustMate | TURNKEY |
| Dust Monitor 3443 | KANOMAX |
| Piezobalace 3521/3522 | KANOMAX |

■ 4.2. Les fibres

Les fibres

De manière générale, la famille des fibres regroupe les constituants des laines isolantes (laine de verre, de roche, ...). Il n'y a pas de mise en place de contrôle des concentrations de fibres dans l'air intérieur, notamment en raison de la source de ses fibres qui provient généralement de leur libération dans l'air lors de manipulations liées à leur mise en place ou à leur enlèvement, d'une mauvaise installation dans les faux plafonds ou d'un problème de ventilation qui disséminerait dans le bâtiment les poussières fibreuses. Une évaluation de la qualité de l'air peut tout de même être effectuée en s'inspirant de celle effectuée dans les lieux de travail et présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Essais d'évaluation de la qualité de l'air, exemple des fibres céramiques réfractaires.

| Caractéristique | Principe de la méthode | Référence de la méthode |
|-----------------|--|-------------------------|
| Prélèvement | Prélèvement par pompage sur membrane filtrante | XP X43-269 |
| Analyse | Comptage sur membrane filtrante par microscopie optique en contraste de phase (MOCP) | XP X43-269 |

Le cas particulier de l'amiante

L'amiante est un minéral naturel fibreux mais en raison du caractère cancérigène de ses fibres, elle a été totalement interdite. Elle peut cependant être toujours présente dans de très nombreux bâtiments en cas d'usure anormale ou lors d'interventions dégradant les matériaux en contenant. Les mesures de concentration en fibres dans l'air intérieur sont clairement définies, que se soit de l'échantillonnage à la technique analytique à utiliser et sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 4 : Échantillonnage pour la détermination de la concentration en fibres d'amiantes dans l'air intérieur.

| Caractéristique | Référence de la méthode | Référence de la méthode |
|--|--|---------------------------------|
| Établissement de la stratégie de prélèvement pour la détermination de la concentration en fibres d'amiante | <ul style="list-style-type: none">• Définition de l'objectif de mesurage• Choix des emplacements de prélèvement en fonction du type d'activité• Détermination de la durée totale de prélèvement et du nombre de prélèvements | NF EN ISO 16000-7 GA X46-033 |
| Détermination de la concentration en fibres d'amiante | Prélèvement statique par pompage sur membrane filtrante | NF X43-050 |

Tableau 5 : Analyse pour la détermination de la concentration en fibres d'amiantes dans l'air intérieur.

| Principe de la méthode | Référence de la méthode |
|---|-------------------------|
| Préparation des grilles après calcination (méthode indirecte) | NF X43-050 |
| Comptage par Microscopie Électronique à Transmission équipée d'un Analyseur en dispersion d'énergie des rayons X (META) | |

5. Polluants biologiques

■ 5.1. Allergènes

Les allergènes respiratoires biologiques présents dans l'air intérieur sont des protéines généralement présentes sur des débris de carapaces ou déjections mêlées aux poussières et proviennent principalement (Nicolle, 2009) :

- ▷ Des acariens (Der p1) : essentiellement dans les déjections et les débris de carapace sous forme de microparticules de 5 µm ;
- ▷ Des blattes (Bla g 1 et Bla g 2) : essentiellement sur la carapace de l'insecte. Ces allergènes sont portés par des particules de taille telle qu'elles sédimentent spontanément au sol, en l'absence de mouvement d'air ;
- ▷ Des animaux domestiques : les 2/3 proviennent du chat (Fel d1), mais aussi du chien (Can f1) ;
- ▷ Des moisissures avec la recherche d'Alt a1 provenant de l'espèce *Alternaria* ou la production de mycotoxines, d'éléments constitutifs des parois de leurs spores et de leur mycélium ($\beta(1,3)$ glucans) ou encore de composés organiques volatils ;
- ▷ Des bactéries : les endotoxines peuvent être des constituants de leur paroi.



L'évaluation de la présence et/ou de la concentration de ces allergènes s'effectuent généralement par échantillonnage des poussières puis en utilisant des tests immunologiques : ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay), RAST (Radio-Allergo-Sorbent Technique), RIA (immunoradioinhibition), RIE (immunoélectrophorèse).

■ 5.2. Les moisissures, bactéries et pollens

Des techniques d'échantillonnage des moisissures ou bactéries viables peuvent être utilisées dans le panel de normes éditées pour la qualité de l'air intérieur :

- ▷ La norme ISO 16000-16:2008 spécifie les exigences d'échantillonnage pour une durée de 30 minutes à plusieurs heures des moisissures dans l'air intérieur par filtration ;
- ▷ La norme ISO 16000-18:2011 spécifie un échantillonnage de courte durée (1 min à 10 min) par impaction des moisissures sur milieu gélosé solide. Exemples : RCS High Flow (Biotest), Impacteur Andersen (Thermo) ;
- ▷ La norme ISO/CD 16000-21 en cours décrira l'échantillonnage à partir de matériaux.

Il est ainsi possible d'établir une véritable stratégie de recherche des bio-contaminants, qu'ils soient aériens en utilisant des prélèvements par bio-impaction (levures, germes totaux) ou cycloniques (légionelles, *Aspergillus fumigatus*).

De nouvelles techniques ont cependant été développée avec notamment la possibilité d'une analyse en temps réel des particules viables présentes dans l'air (Biotrak - TSI).

La technique du biocollecteur/cytomètre en phase solide est une analyse qui en lui appliquant une méthode par transparence permet de déterminer qualitativement et quantitativement des particules (pollens, moisissures, etc...) sur l'ensemble de l'échantillon. Il est également possible d'appliquer une méthode par microscopie optique qui permettra un examen des cultures, des filtres ou des lames contenant les particules biologiques.

Des recherches en contaminants peu coûteuses peuvent également être utilisées à titre indicatif en procédant à des prélèvements de contact :

- ▷ Gélose de contact ;
- ▷ Frottis pour échantillonnage ;
- ▷ Analyse directe sur les matériaux (gypse, bois, isolant, etc.) ;
- ▷ Analyse de la poussière déposée peut être également pertinente dans certains cas.

Enfin, la norme ISO 16000-17:2008 décrit une méthode de détection et de dénombrement des moisissures par culture après échantillonnage par impaction ou par filtration. Cette méthode pourra également être utilisée pour une culture de moisissures à partir de matières en suspension ou de culture directe sur boîte de Pétri.

Synthèse et recommandations

Les bâtiments ayant été identifiés comme le principal gisement d'économies d'énergie, les efforts des acteurs du secteur se sont naturellement portés sur la réduction des consommations énergétiques. Cela a été particulièrement le cas sur les constructions neuves qui ont fait l'objet de normes renforcées avec dernièrement l'entrée en vigueur de la RT 2012.

Or l'efficacité énergétique ne peut être dissociée de l'usage du bien et donc de la qualité de l'ambiance intérieure de celui-ci. C'est-à-dire la qualité de l'air intérieur, la luminosité (naturelle et artificielle) et bien sûr l'acoustique.

De plus, la qualité de l'air intérieur est un élément particulièrement important à prendre en considération puisqu'il a un impact direct sur la santé des occupants du bâtiment.

Concrètement, une bonne qualité de l'air peut être assurée par la prise en compte anticipée de certains facteurs clés ;

- Une ventilation adaptée à la qualité de l'air extérieur et aux besoins des occupants, efficace et facile d'accès.
- Le choix des matériaux doit être fonction de leur nocivité (émissions de polluants associées), choix qui est facilité par l'étiquetage des caractéristiques d'émission des matériaux de construction / décoration devenu obligatoire.
- Enfin, certains polluants doivent faire l'objet d'un traitement particulier comme l'amiante, le radon ou le monoxyde de carbone, ils sont de plus soumis à des réglementations particulières.

Par ailleurs, la gestion de l'ambiance intérieure du bâtiment doit se faire tout au long de l'exploitation de l'immeuble, pour préserver la santé des occupants. Cela nécessite un suivi constant, qui passera par la généralisation de mesures in situ.

Les points clés de vigilance, adaptés aux différents intervenants dans le cycle de vie d'un immeuble, sont résumés dans les fiches qui clôturent ce mémento. Elles ont été rédigées dans le but de donner un canevas de réflexion aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, gestionnaires/exploitants et utilisateurs dans leur prise en compte de la problématique qualité d'air intérieur.

Fiches pour intervenants

La majorité des différents points listés dans les différentes fiches a été tirée du Guide « Construire sain » (2011) élaboré par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

1. Maître d'ouvrage (Phase conception/Rédaction/Immeuble Neuf)

■ Rechercher les sources de polluants de l'environnement du bâtiment

• Pollution de l'Air Extérieur

▷ ATMO (www.atmo-france.org)

• Radon

▷ Cartographie (www.irsn.fr)

• Amiante

▷ Plan local d'urbanisme (PLU)

• Pollution du sol

▷ BASOL (www.basol.ecologie.gouv.fr)

▷ BASIAS (www.basias.brgm.fr)

■ Définir les exigences d'aération à mettre en place par espace

• Occupation des locaux

▷ Identification et localisation sur le plan masse des locaux à pollution spécifique (séchage de linge, salle de bain, garage, local de reprographie, locaux dédiés aux déchets...)

• Niveau de QAI selon la norme EN 15251(recommandé) : Catégorie I ou II

▷ Débits de renouvellement d'air

▷ Niveau de filtration (particules et gaz)

• Principe de ventilation

Le choix de la ventilation est fait par le maître d'ouvrage sur suggestion du maître d'œuvre.

▷ Ventilation naturelle en fonction de la qualité de l'air extérieure

▷ Ventilation mécanique

– Simple flux par extraction, entre autres :

• Autoréglable

• Hygroréglable

– Double flux par insufflation et extraction, par exemple :

• Filtration

• Récupérateur de chaleur

▷ Positionnement des bouches d'entrées d'air loin des pollutions extérieures et intérieures (parking, garage, cheminées de chauffage, stockage des déchets, rue avec trafic important, extractions d'air vicié, locaux à pollution spécifiques)

■ Inciter à éviter ou à réduire les sources polluantes

• Étiquetage des produits de construction et de décoration selon les certifications existantes

• Prévoir dès la conception des matières lisses pour les gaines de ventilation afin de faciliter le nettoyage et installer des trappes d'accès accessibles

2. Maître d'œuvre (Construction/Réalisation)

| | |
|--|---|
| PHASE CONCEPTION | <ul style="list-style-type: none"> ■ Prendre des mesures préventives en cas de présence de polluants • Pollution extérieure <ul style="list-style-type: none"> ▷ Filtration en relation avec le niveau de pollution extérieure et la qualité de l'air intérieur requise • Exemple : le Radon <ul style="list-style-type: none"> ▷ Limiter la surface de contact avec le sol ▷ Vérifier l'étanchéité entre le bâtiment et son soubassement ▷ Veiller à ventiler le soubassement et le bâtiment ■ Rechercher des produits de construction les moins polluants possibles ■ Faciliter la maintenance du réseau de ventilation (accès aux filtres,...) et prévoir une métrologie adaptée ■ Limiter les zones potentielles de condensation pour réduire le risque de moisissures • Traitement des ponts thermiques ■ Choisir des équipements normalisés |
| PHASE CHANTIER | <ul style="list-style-type: none"> ■ Stocker les matériaux et équipements de chantier dans un endroit propre • Boucher les extrémités des conduits de ventilation • Protéger des intempéries les produits d'origine végétale afin de limiter le risque de développement de moisissures • Protéger par un film ou une couche de peinture les matériaux fibreux afin d'empêcher le défibrage ■ Prendre en compte les délais de séchage et d'aération des locaux (selon Documents Techniques Unifiés) |
| PHASE RECEPTION DES TRAVAUX | <ul style="list-style-type: none"> ■ Faire contrôler la conformité des installations des équipements aux règles de l'art et aux normes en vigueur • Vérifier la présence de grille de passage et de détalonnage des portes pour le passage de l'air • Contrôler la bonne étanchéité du réseau de ventilation • Contrôler l'installation étanche des filtres ■ Rédiger un carnet sanitaire <p>Il est indispensable de transmettre des documents adaptés sur le fonctionnement des équipements et du bâtiment aux exploitants</p> |

3. Gestionnaire/Exploitant

- **Vérifier l'adéquation entre l'usage prévu des locaux et l'exploitation technique qui en est faite**

- **Vérifier que le bon fonctionnement du système de ventilation**
 - Vérifier que les odeurs et impuretés des matériaux neufs ont bien extraites par le système de ventilation au cours des premiers mois, de même en cas de changement du mobilier

- **Programmer l'entretien et la maintenance du réseau de ventilation**
 - Nettoyer les bouches d'extraction et d'insufflation d'air
 - Renouveler les filtres dès que nécessaire
 - Procéder à un nettoyage du réseau de gaines de ventilation périodiquement
 - Nettoyer tous les systèmes sujets à condensats
 - Favoriser un entretien et une maintenance les moins polluants possibles

- **Traiter toute anomalie ou incident pouvant impacter la qualité de l'air intérieur rapidement (dégât des eaux, dégradation ou compression d'une gaine)**

- **Surveillance de la Qualité de l'Air**
 - Procéder à des campagnes périodiques de mesures des polluants prioritaires
 - Polluants
 - Métrologie
 - Définir la fréquence de ces mesures et l'échantillonnage adapté

- **Sensibiliser les utilisateurs**
 - Comment fonctionne et s'entretient le système de ventilation ?
 - Ne pas obturer les entrées et sorties d'air
 - Choisir l'ameublement, les produits d'entretien et d'ambiance (bougie parfumées, encens, ...)
 - Comprendre les risques liés à l'utilisation inadéquate d'appareils d'appoint à combustion non raccordés
 - Effectuer une enquête de satisfaction des occupants après 6 mois, 1 an, puis tous les 2, 3 ans. Intégrer un questionnaire santé lié au bâtiment (comprenant les symptômes cités par l'OMS : céphalées, troubles de la concentration, asthénie, irritation cutanée ou des muqueuses, nasale, oculaire et des voies aériennes supérieures...)
 - Effectuer le suivi du carnet sanitaire
 - Rédiger un guide « utilisateur » rappelant les principes d'utilisation du bâtiment

4. Utilisateurs

Le chef d'établissement

- **Effectuer des mesures liées à la qualité de l'air**

Les usagers

- **Bien choisir l'ameublement et les matériaux de décoration**
 - Étiquetage des produits de construction et de décoration
 - Prendre en compte les prescriptions du gestionnaire
- **Bien choisir les produits d'entretien**
 - Comprendre l'étiquetage des produits d'entretien (Eco-label...)
 - Respecter les indications d'utilisation (dosage)
 - Limiter au mieux les résidus de produits lors du nettoyage
 - Surventiler le local pendant le nettoyage
- **Avoir conscience de l'impact de l'ameublement, des produits d'entretien et d'ambiance (bougie parfumées, encens, ...), d'antimites... sur la qualité de l'air**
- **Utiliser la ventilation à bon escient**
 - Aérer par ouverture des fenêtres dès qu'il y a production de vapeur, cuisson ou travaux de bricolage et au moins une fois par jour si le principe d'aération est basé uniquement sur ce mode de ventilation
 - Ne pas obstruer les bouches d'entrée et de sortie d'air (même en hiver)
 - Adapter la ventilation à l'occupation et à l'activité si le système est à contrôle manuel
- **Limitier le développement de moisissures**
 - Limiter la production de vapeur d'eau (utilisation de couvercle sur les casseroles, ne pas faire couler de l'eau chaude plus que nécessaire...)
 - Ne pas laisser de l'eau stagnante dans les salles de bain, cuisines...
 - Éviter les poussières dans les pièces humides
 - Aérer les supports possibles de moisissures (matelas, coussins, canapés...)
 - Ne pas coller les meubles contre les murs
- **Signaler tout dégât des eaux ou apparition d'humidité, voire de condensation, sur les parois pouvant provoquer le développement de moisissures**

Glossaire

| | |
|-----------|---|
| AASQA | Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air |
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie |
| ANSES | Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail |
| BBC | Bâtiment à Basse Consommation |
| BEPOS | Bâtiment à Energie POSitive |
| BSI | Indice des bâtiments malsains (Building Syndrome Index) |
| BUMA | Base de données « prioritization of BUilding MAterials as indoor pollution sources » |
| CAS | Numéro d'identification des substances chimiques (Chemical Abstracts Service) |
| CIRC | Centre International de Recherche sur le Cancer |
| CMR | Cancérogène, Mutagène ou Toxique pour la reproduction |
| CO | Monoxyde de carbone |
| CO2 | Dioxyde de carbone |
| COSV | Composés Organiques Semi-Volatils |
| COV | Composés Organiques Volatils |
| COVT | Composés Organiques Volatils Totaux |
| DNPH | 2,4-dinitrophénylhydrazine |
| DPEB | Directive Performance Energétique des Bâtiments |
| ERP | Etablissement Recevant du Public |
| GC/MS | Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (Gas Chromatography/ Mass Spectrometry) |
| HAP | Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques |
| HCSP | Haut Conseil de la Santé Public |
| HPLC | Chromatographie en phase liquide à haute performance (High Performance Liquid Chromatography) |
| HQE | Haute Qualité Environnementale |
| HRGC/HRMS | Chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (High Resolution Gas Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry) |
| IAPI | Indoor Air Pollution Index |
| INDEX | Projet Européen « Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU » |
| IRSN | Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire |
| LHVP | Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris |
| MEDB-IAQ | Base de données « a Material Emission DataBase and single-zone Indoor Air Quality simulation program » |
| META | Microscopie Electronique à Transmission équipée d'un Analyseur |
| MOCP | Microscopie Optique avec Contraste de Phase |
| NO | Monoxyde d'azote |
| NO2 | Dioxyde d'azote |
| O3 | Ozone |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| OQAI | Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur |
| PANDORE | Base de données « une compIlAtion des émissioNs Des pOlluants de l'aiR intériEur » |
| PCB | PolyChloroBiphényles |
| PEPB | Phényl-Ether PolyBormés |

| | |
|----------|--|
| PMx | Poussières dont la taille des particules est inférieure à x µm avec x=10, 2,5 ou 1 (Particulate Matter) |
| POPS | Percent of Occupants with Persistent Symptoms |
| QAI | Qualité de l'Air Intérieur |
| REACH | Programme Européen d'enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of CHemical substances) |
| RT 2012 | Réglementation Thermique Française (2012) |
| SBM | Syndrome des Bâtiments Malsains |
| SOPHIE | Base de données « a database of SOurces of Pollution for a Healthy and comfortable Indoor Environment » |
| UNICLIMA | Syndicat professionnel des industries aérauliques, thermiques et frigorifiques |
| VGAI | Valeur Guide pour l'Air Intérieur |
| VLE | Valeur Limite d'Exposition |
| VMC | Ventilation Mécanique Contrôlée |
| VRI | Valeur à Risques Importants |
| VRL | Valeur à Risques Limités |
| VTR | Valeur Toxicologique de Référence |

Références bibliographiques

Chapitre 1 : La problématique et les enjeux de la qualité de l'air dans les bâtiments

Chouaid C., Vergnenegre A., Vandewalle V., Liebaert F., Khelifa A. 2004. *Coûts de l'asthme en France : modélisation médico-économique par un modèle de Markov*. *Revue des maladies respiratoires*, 3, pp. 493-499.

Crump D., Bland B., Mann H., Brown V., Ross D. 1999. *Personal exposure to air pollutants in Hertfordshire, England*. *Proceedings of the 8th International conference on indoor air quality and climate*, Indoor Air '99, Edinburgh, Scotland, 8-13 August 1999, Volume 5, pp. 288-293.

De Oliveira Fernandes E., Jantunen M., Carrer P., Seppänen O., Harrison P., Kephelopoulou S. 2009. *ENVIE Co-ordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects, Final report of EU project no. SSPE-CT-2004*.

Fisk W.J., Mirer A.G., Mendell M.J. 2009. *Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates*, *Indoor Air*, 19(2), pp. 159-165.

Kirchner S. 2011. *Qualité d'air intérieur, qualité de vie – 10 ans de recherche pour mieux respirer*. CSTB éditions, ISBN 978-2-86891-505-4, 208 p.

Kleiweis N.E., Nelson W.C., Ott W.R., Robinson J., Tsang A.M., Switzer P., Behar J.V., Hern S., Engelmann W. 2001. *The national human activity pattern survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants*. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), pp. 231-252.

Milton D.K., Glencross P.M., Walters M. D. 2000. *Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints*. *Indoor Air*, 10(4), pp 212-221.

Seppanen O., Fisk W.J., Lei Q.H. 2006. *Ventilation and performance in office work*. *Indoor Air*, 16, pp. 28-36.

Wargocki P., Wyon D.P. 2007a. *The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children (RP-1257)*. *HVAC&R Research*, 13(2), pp. 165-191.

Wargocki P., Wyon D.P. 2007b. *The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257)*. *HVAC&R Research*, 13(2), pp. 193-220.

Chapitre 2 : Les polluants, leurs sources et leurs effets sur la santé

Arene J.F., Cochet C., Derbez M., Duboudin C., Elias P., Gregoire A., Jedor B., Kirchner S., Lucas J.P., Pasquier N., Pignernet M., Ramalho O. 2006. *Campagne nationale logements: état de la pollution dans les logements français*. *Rapport du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, DDD/SB – 2006-57*, 165 p.

Bornehag C.G., Sundell J., Weschler C.J., Sigsgaard T., Lundgren B., Hasselgren M., Hagerhed L. 2004. *The association between asthma and allergic symptoms in children and phthalates in house dust: a nested case-control study*. *Environmental Health Perspectives*, 112, pp. 1393-1397.

Bornehag C.G., Sundell J., Sigsgaard T., Hagerhed-Engman L. 2005. *Association between ventilation rates in 390 Swedish homes and allergic symptoms in children: a nested case control study*. *Indoor Air*, 4, pp.75-80.

Duval G., Simonot B. 2010. *Les perturbateurs endocriniens : un enjeu sanitaire pour le XXI^e siècle*. *Air pur*, 79, pp. 9-18.

HQE. 2002. *La pollution intérieure des bâtiments, la connaître pour la prévenir*. *Association HQE, Editions Weka*, 2002, 120 p.

Menzies D., Bourbeau J. 1997. *Building-related illnesses*, *New England Journal of Medicine*, 337, pp. 1524-1531.

Owen M.K., Ensor D.S., Hovis L.S. Tucker W.G., Sparks L.E. 1990. *Particle size distributions for an office aerosol*. *Aerosol Science and Technology* 13(4), pp. 486-492.

WHO. 2000. *Air Quality Guidelines for Europe second edition*. *World Health Organization, WHO Regional Publications, 2000, European series*, 91, 288 p.

Zhu J., Harner T., Kuwabo C., White P., Shoeib M., Wilford B.H., Feng Y.L. 2007. *Semi-volatile organic pollutants in indoor air and indoor dust in Ottawa residences and implications for human exposure*. *Proceedings of the 6th Conference on Indoor Air Quality, ventilation and Energy Conservation in Buildings (IAQVEC), Sendai (Japon)*, 28-31 Octobre 2007.

Chapitre 3 : L'évolution temporelle des polluants

Abadie M.O., Blondeau P. 2010. *PANDORA database: A compilation of indoor air pollutant emissions*. *HVAC & R Research*, 17, pp. 602-613.

AFNOR. 2007. *Norme NF EN 15251: Critères d'ambiance pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*.

AFNOR. 2007. *Norme NF EN 13779 : Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Exigences de performances des systèmes de ventilation et de conditionnement d'air*.

AFNOR. 2010. *Norme NF ISO 16814 : Conception de l'environnement des bâtiments – Qualité de l'air intérieur – Méthodes d'expression de la qualité de l'air intérieur pour une occupation humaine*.

AFNOR. 2011. *Norme NF EN 13053 : Ventilation des bâtiments - Caissons de traitement d'air – Classification et performance, composants et sections*.

AICVF. 2007. *Recommandations : Qualité de l'Air Intérieur et Ventilation*. *Association des Ingénieurs en Climatologie, Ventilation et Froid*, ISBN 978-2-9522535-4-3, 70 p.

Allard F., Tiffonnet A.L., Abadie M., Blondeau P. 2002. *Qualité de l'air intérieur. Rapport pour le Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement* (Ed.).

Auvinen J., Wirtanen L. 2008. *The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality*. *Atmospheric Environment*, 42(18), pp. 4101-4112.

Bartzis J.G., Canna-Michaelidou S., Kotzias D. 2009. *BUMA Project Results Assessment*. <http://www.enman.uowm.gr/bumaproject/>.

Bluyssen P.M., Fernandes E.O., Molina J.L. 2000. *Database for sources of pollution for healthy and comfortable indoor environment (SOPHIE): Status 2000*, *Healthy Buildings 2000*, Helsinki, August 2000, vol.4, pp. 385-390.

Guide « Construire sain ». 2011. *Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation*, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, Novembre.

Nazaroff W.W., Cass G.R. 1989. *Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics*. *Environmental Science and Technology*, 23, pp. 157-166.

Salthammer T., Fuhrmann F. 2007. *Photocatalytic reactions on indoor wall paint*. *Environmental Science and Technology*, 41, pp. 6573-6578.

UNICLIMA. 1999. *Guide Climatisation et santé*, Editions SEPAR.

U.S. EPA. 1999. *Sources of Indoor Air Emissions*. U.S. Environmental Protection Agency.

Weschler C.J., Shields H.C. 1999. *Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles*. *Atmospheric Environment*, 33, pp. 2301-2312.

Zhang J.S., Shaw C.Y., Sander D., Zhu J.P., Huang Y. 1999. *MEDB-IAQ: A Material Emission Database and Single-Zone IAQ Simulation Program – A Tool for Building Designers, Engineers and Managers*. *National Research Council Canada, Report*.

Chapitre 4 : Les méthodes d'évaluation de la QAI et la hiérarchisation des polluants

Abadie M.O., Blondeau P. 2010. *PANDORA database: A compilation of indoor air pollutant emissions*. HVAC & R Research, 17, pp. 602-613.

ANSES. 2009. *Protocole de caractérisation des émissions de COV par les matériaux. Rapport d'expertise collective, Comité d'experts spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », Groupe de travail « Composés organiques volatils »*, Septembre, 75 p.

Cariou S., Guillot J.M. 2005. *A global indicator as a tool to follow airborne molecular contamination in a controlled environment*. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 381, pp. 850-853.

Cariou S., Guillot J.M. 2005. *Utilisation d'un indice global de la qualité de l'air intérieur pour suivre l'ensemble des COV présents et leur impact sur la santé humaine*. Air Pur, 69.

Castanet S. 1998. *Contribution à l'étude de la ventilation et de la qualité de l'air intérieur des locaux*, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA).

Chiang C.M., Lai C.M. 2002. *A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan*. Building and Environment, 37 (4), pp. 387-392.

Cicoella A. 2010. *Évaluation des risques liés aux perturbateurs endocriniens : le changement de paradigme*. Air pur, 79, pp. 19-24.

Cohas M. 1996. *Ventilation et Qualité de l'Air dans l'Habitat*. Numéro spécial de la revue Chaud Froid Plomberie.

CSHPF. 1993. *Allergie respiratoire, asthme, environnement*. Conseil supérieur d'hygiène publique de France, Direction générale de la santé, 92 pages.

Duval G., Simonot B. 2010. *Les perturbateurs endocriniens : un enjeu sanitaire pour le XXI^{ème} siècle*, Air pur, 79, pp. 9-18.

Gadeau A.L. 1996. *Assessment of ventilation strategies using an air quality index introduced in CLIM 2000 software*. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Espoo, Finland, 4, pp. 23-24.

Haverinen U., Vahteristo M., Pekkanen J., Husman T., Nevalainen A., Moschandreas D. 2003. *Formulation and Validation of an Empirical Moisture Damage Index*. Environmental Modeling and Assessment, 8(4), pp. 303-309.

INDEX. 2005. *The INDEX project: Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor exposure Limits in the EU*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit, Ispra, Italy (JRC/IHCP/PCE), Report, 338 p.

Kirchner S., Jédon B., Mandin C. 2006. *Élaboration d'indices de la qualité de l'air intérieur : phase 1 – Inventaire des indices disponibles*. Rapport DDD-SB/2006-065.

Kirchner S. 2011. *Qualité d'air intérieur, qualité de vie – 10 ans de recherche pour mieux respirer*. CSTB éditions ISBN 978-2-86891-505-4, 208 p.

Lichtenstein P., Holm N.V., Verkasalo P.K., Iliadou A., Kaprio J., Koskenvuo M., Pukkala E., Skytthe A., Hemminki K. 2000. *Environmental and heritable factors in the causation of cancer: analyses of cohorts of twins from Sweden, Denmark and Finland*. New England Journal of Medicine, 13, pp. 78-85.

Moschandreas D.J., Sofuoglu S.C. 2004. *The indoor environmental index and its relationship with symptoms of office building occupants*. Journal of the Air and Waste Management Association, 54(11), pp. 1140-1451.

Park J.-H., Schleiff P.L., Attfield M.D., Cox-Ganser J.M., Kreiss K. 2004. *Building-related respiratory symptoms can be predicted with semi-quantitative indices of exposure to dampness and mold*. Indoor Air, 14(6), pp. 425-433.

Sofuoglu S.C., Moschandreas D.J. 2003. *The link between symptoms of office building occupants and in-office air pollution: the Indoor Air Pollution Index*. Indoor Air, 13, pp. 332-343.

WHO. 2010. *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. World Health Organization, Regional office for Europe. Téléchargeable à l'adresse: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

Chapitre 5 : La réglementation

Bonnet C. 2011. *Les politiques publiques et le cadre réglementaire*. Journée d'information sur la QAI. DREAL Poitou-Charentes – 10 novembre 2011.

Brelh N., Seppänen O. 2011. *Ventilation rates and IAQ in national regulations*. Proceedings of the 32nd AIVC conference and 1st TightVent conference in Brussels, 12 – 13 October 2011.

NF EN 15251 (août 2007) : *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique* (Indice de classement : E51-762).

Rousselle C., Mandin C., Azuma K. 2011. *Valeurs guides de qualité d'air intérieur : analyse comparative des approches française et japonaise*, Env Risque Santé, 10 (1), pp. 25-34.

http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/radon/Pages/sommaire.aspx

<http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx?idarchitecture=236>

Évaluation des performances métrologiques des appareils de mesure spécifiques de l'air intérieur, Rapport INERIS pour le LCSQA, 2008

Chapitre 6 : La métrologie

NF EN 45544 (Mai 2000) *Atmosphères des lieux de travail - Appareillage électrique utilisé pour la détection directe des vapeurs et gaz toxiques et le mesurage direct de leur concentration - Partie 1 : exigences générales et méthodes d'essai*.

NF EN 14626 (Avril 2010) *Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée de mesurage de la concentration en monoxyde de carbone par la méthode à rayonnement infrarouge non dispersif*.

NF EN 14211 (Avril 2010) *Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde d'azote et monoxyde d'azote par chimiluminescence*.

NF EN ISO 16000-3 (Décembre 2011) *Air intérieur - Dosage du formaldéhyde et d'autres composés carbonylés dans l'air intérieur et dans l'air des chambres d'essai - Partie 3 : méthode par échantillonnage actif*.

NF EN ISO 16000-5 (Mai 2007) *Air intérieur - Partie 5 : stratégie d'échantillonnage pour les composés organiques volatils (COV)*.

ISO 16000-6 (Mars 2012) *Air intérieur - Partie 6 : dosage des composés organiques volatils dans l'air intérieur des locaux et chambres d'essai par échantillonnage actif sur le sorbant Tenax TA(R), désorption thermique et chromatographie en phase gazeuse utilisant MS ou MS/FID*.

NF EN ISO 16017-2 (Octobre 2003) *Air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail - Échantillonnage et analyse des composés organiques volatils par tube à adsorption/désorption thermique/chromatographie en phase gazeuse sur capillaire - Partie 2 : échantillonnage par diffusion*.

NF EN ISO 16000-13 (Avril 2009) *Air intérieur - Partie 13 : dosage des polychlorobiphényles (PCB) de type dioxine et des polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD)/polychlorodibenzofuranes (PCDF) totaux (en phase gazeuse et en phase particulière) - Collecte sur des filtres adsorbants*.

NF EN ISO 16000-14 (Août 2009) *Air intérieur - Partie 14 : dosage des polychlorobiphényles (PCB) de type dioxine et des polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD)/polychlorodibenzofuranes (PCDF) totaux (en phase gazeuse et en phase particulière) - Extraction, purification et analyse par chromatographie en phase gazeuse haute résolution et spectrométrie de masse*.

- XP X43-269 (Avril 2012) *Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META . Comptage par MOCP.*
- NF EN ISO 16000-7 (Septembre 2007) *Air intérieur - Partie 7 : stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air.*
- GA X46-033 (Août 2008) *Air intérieur - Partie 7 : stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air - Guide d'application de la norme NF EN ISO 16000-7:2007.*
- NF X43-050 (Janvier 1996) *Qualité de l'air - Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission - Méthode indirecte.*
- NF EN ISO 16000-16 (Février 2009) *Air intérieur - Partie 16 : détection et dénombrement des moisissures - Échantillonnage par filtration.*
- NF EN ISO 16000-18 (Septembre 2011) *Air intérieur - Partie 18 : détection et dénombrement des moisissures - Échantillonnage par impaction.*
- ISO/CD 16000-21 (Projet) *Air intérieur - Partie 21: Détection et dénombrement des moisissures - Échantillonnage à partir de matériaux*
- ISO 16000-17 (Février 2009) *Air intérieur - Partie 17 : détection et dénombrement des moisissures - Méthode par culture.*
- http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/radon/Pages/sommaire.aspx
- <http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx?idarchitecture=236>
- Marchand C. 2008. *Évaluation des performances métrologiques des appareils de mesure spécifiques de l'air intérieur. Rapport INERIS pour le LCSQA (<http://www.lcsqa.org/>).*
- Larbre J., Marchand C. 2009. *Bilan/veille sur la qualité de l'air intérieur à un niveau national et international : travaux récents et nouveaux instruments disponibles. Rapport INERIS pour le LCSQA (<http://www.lcsqa.org/>).*
- Meininghaus R. Kouniali A. Mandin C. Cicolella A. 2003. *Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. Environment International, 28(7), pp. 553-557.*
- Farrow A., Taylor H., Northstone K., Golding J. 2003. *Symptoms of mothers and infants related to total volatile organic compounds in household products. Archives of Environmental Health, 58(10), pp. 633-641.*
- Lévesque B., Auger P.L., Bourbeau J., Duchesne J-F., Lajoie P., Menzies D. 2003. *Qualité de l'air intérieur. Environnement et santé publique – Fondements et pratiques, pp. 317-332.*
- Onishi M., Sekine Y., Sugihara K., Kitasaka K., Shimajiri H. 2007. *Passive sampler for the determination of carbonyl compounds in indoor air employing O-(4-cyano-2-ethoxybenzyl) hydroxylamine as reactive adsorbant. J Health Sci, 53, pp. 413-422.*
- Koziel JA., Noah J., Pawliszyn J. 2001. *Field sampling and determination of formaldehyde in indoor air with solid-phase microextraction and on-fiber derivatisation. Environ Sci Technol, 35, pp. 1481-1486.*
- Pinheiro H.L.C., de Andrade M.V., de Paula Pereira P.A., de Andrade J.B. 2004. *Spectrofluorimetric determination of formaldehyde in air after collection onto silica cartridges coated with Fluoral P. Microchemical Journal, 78, pp. 15-20.*
- OSHA. 1989. *Acroleine and/or formaldehyde.* Disponible sur : <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/organic/org052/org052.html>. Sai Hang Ho et al., 2002
- Sai Hang Ho, S. and J. Z. Yu (2002). «Feasibility of collection and analysis of airborne carbonyls by on-sorbent derivatization and thermal desorption.» *Anal. Chem.* 74: 1232-1240.
- Cozic R. 2004. *Développement d'un analyseur de gaz transportable : couplage thermodésorbteur / micro-chromatographe / spectromètre de masse (m-TD / m-CG / SM) – Application à l'analyse en ligne des composés organiques volatils à l'état de traces. Thèse de Doctorat de l'université Claude Bernard – Lyon 1.*
- Nicolle J. 2009. *Développement d'une méthodologie d'analyse des composés organiques volatils en traces pour la qualification de matériaux de construction. Thèse de Doctorat de l'université de Pau et des pays de l'Adour.*

Fiches pour intervenants

- Guide « Construire sain ». 2011.
Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, Novembre.

Annexe 1 :

Modalité de calcul de l'indice IAPI

Elaboré à partir des mesures de concentrations en polluants et des enquêtes sanitaires réalisées dans 100 immeubles de bureaux répartis sur l'ensemble du territoire américain (étude BASE : Building Assessment Survey and Evaluation, menée par l'US-EPA dans les années 1990), l'indice IAPI combine les concentrations et les valeurs limites d'exposition des 8 polluants appartenant à des catégories différentes par la relation :

$$IAPI = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K 10 \times \left[1 - \frac{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{\min}} \left(\frac{C_{i,j,k}^{dmc} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{dmc}} \right) \right]$$

Avec :

I : nombre de groupes au niveau 3 ;

J : nombre de groupes de niveau 2 dans chaque groupe de niveau 3 ;

K : nombre de polluants de niveau 1 dans chaque groupe de niveau 2 ;

C^{\max} : concentrations maximales issues de l'étude BASE ;

C^{\min} : concentrations minimales issues de l'étude BASE ;

C^{obs} : concentrations mesurées dans le bâtiment étudié ;

C^{dmc} : valeurs limites d'exposition / valeurs guides (démarcation concentrations) ;

$C_{i,j,k}$: concentrations du polluant k appartenant au sous-groupe j (niveau 2) du groupe i (niveau 3).

Trois règles complètent par ailleurs l'équation (13) :

- ▷ Si une concentration mesurée dans le bâtiment étudié est supérieure à la concentration maximale mesurée dans le cadre de l'étude BASE ($C^{obs} > C^{\max}$), il convient de prendre $C^{obs} = C^{\max}$ et $C^{obs} = C^{dmc}$ pour le calcul ;
- ▷ Si la concentration mesurée d'un polluant se situe entre la valeur limite d'exposition et la valeur maximale ($C^{dmc} < C^{obs} < C^{\max}$), alors $C^{obs} = C^{dmc}$;
- ▷ Si la concentration mesurée d'un polluant est inférieure à la concentration minimale mesurée dans le cadre de l'étude BASE ($C^{obs} < C^{\min}$), l'indice IAPI doit être calculé en prenant $C^{obs} = C^{\min}$.

Ainsi défini, l'indice IAPI varie entre 0 et 10, 0 exprimant la meilleure qualité de l'air possible et 10 une qualité de l'air médiocre. La décomposition de l'indice en sous-indices (termes de la somme) permet par ailleurs de compléter l'information en identifiant le ou les polluants dominants. En prenant comme référence les valeurs limites d'exposition indiquées dans le [Tableau 3](#), Sofuoglu et Moschandreas (2004) ont démontré que l'indice IAPI permettait d'expliquer 67% de la variabilité des symptômes ressentis par les occupants des bâtiments investigués dans le cadre de l'étude BASE. Pour améliorer encore cette performance, les mêmes auteurs ont ensuite développé un indicateur de qualité des environnements intérieurs, l'indice IEI (Indoor Environmental Index), défini comme la moyenne arithmétique de l'indice IAPI et de l'indice IDI (Indoor Discomfort Index), un indice de confort thermique construit sur le même principe que l'indice IAPI à partir des températures et humidités relatives mesurées dans le cadre de l'étude BASE (Sofuoglu et Moschandreas, 2004).

Sofuoglu et Moschandreas (2003) ont également obtenu une corrélation forte entre les valeurs de l'indice IAPI et la variable POPS (Percent of Occupants with Persistent Symptoms) qui représente le pourcentage d'occupants présentant au moins un symptôme persistant (c'est-à-dire pendant un minimum de 1 à 3 jours par semaine durant les quatre dernières semaines). Les symptômes considérés sont les yeux secs, la respiration sifflante, les maux de tête, les maux de gorge, les difficultés respiratoires, les infections des sinus, la toux, la fatigue oculaire, la tension, les douleurs au niveau du dos, les éternuements, les sensations de déprime, le souffle court, les difficultés de concentration, les nausées, la peau sèche, la fatigue, les vertiges et les douleurs au niveau des mains. La corrélation obtenue (équation suivante) permet ainsi d'évaluer l'indice IAPI à partir de simples questionnaires et de déterminer la nécessité de réaliser des mesures sur site.

$$IAP\text{I} = 0,25 \times \text{POPS} - 14,3$$

À titre d'exemple, la [Figure 3](#) présente les valeurs de l'indice IAPI et de ses sous-indices pour le cas d'un bâtiment présentant une bonne qualité d'air pour lequel la pollution est essentiellement causée par une concentration relativement élevée de COV totaux. La [Figure 4](#) illustre l'effet d'utiliser des produits de nettoyage dans ce bâtiment qui cause d'une part une augmentation du formaldéhyde et des COV totaux mais également de particules dont le rôle devient aussi important que les gaz organiques.

Tableau 3 : Valeurs limites d'exposition, valeurs minimales et maximales prises comme référence pour le calcul de l'indice IAPI.

| Polluant | Unité | Valeur limite d'exposition C^{dmc} | Valeur maximale C^{max} | Valeur minimale C^{min} |
|--------------------|--------------------------|---|------------------------------|---------------------------|
| Formaldéhyde | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 60 | 43,6 | 3,4 |
| COV _{Tot} | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 200 | 9820 | 159 |
| CO | mg/m^3 | 10 | 2,413 | 0 |
| CO ₂ | ppm | 1000 | 983 | 381 |
| PM ₁₀ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 150 | 42,1 | 3,6 |
| PM _{2,5} | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 40 | 24,7 | 2,4 |
| Champignons | ufc/m ³ | 500 | 333,3 | 3,5 |
| Bactéries | ufc/m ³ | 500 | 134,3 | 0 |

Figure 3 : Illustration de l'indice IAPI – État de référence d'un bâtiment sain.

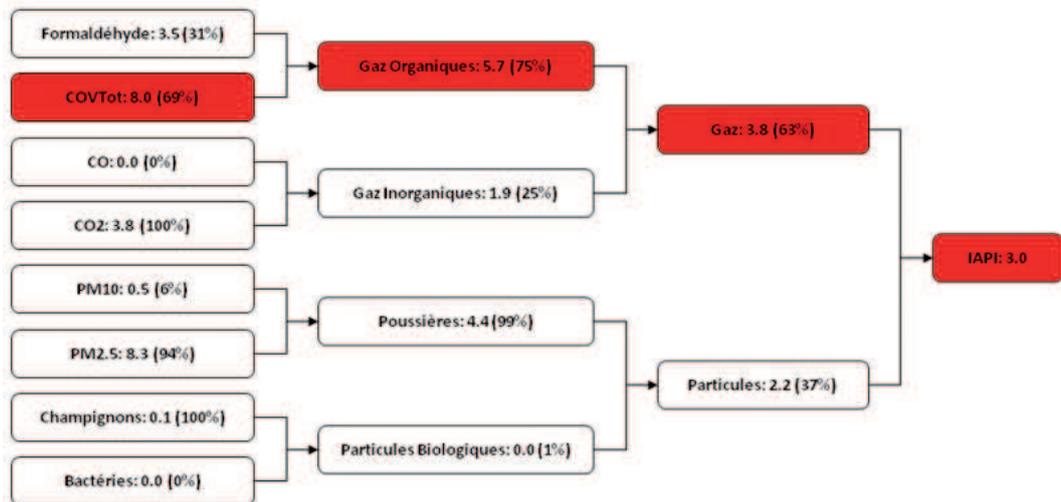
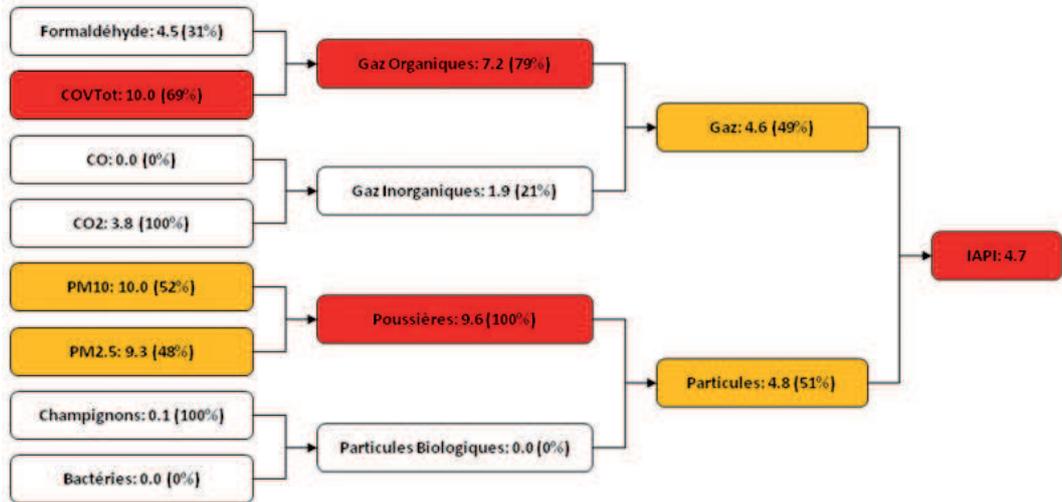




Figure 4 : Illustration de l'indice IAPI – Influence de l'utilisation des produits de nettoyage.



Annexe 2 : Réglementation existante sur l'aération et la ventilation

Les logements

En France, la réglementation existante sur l'aération des locaux distingue les logements des locaux autres que d'habitation. Les arrêtés du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983 relatifs à l'aération des logements neufs reprennent le principe d'aération par pièce décrit dans le décret du 22 octobre 1955 et l'arrêté du 14 novembre 1958 et du principe de la ventilation générale et permanente des logements, par ventilation naturelle par conduits à tirage naturel ou par ventilation mécanique de l'arrêté du 22 octobre 1969 (Figure V.1). Ainsi, les pièces principales doivent comporter des entrées d'air, et l'évacuation de l'air se fait dans les pièces de service (cuisine, salles d'eau, toilettes), l'air devant pouvoir circuler librement des pièces principales vers les pièces de service (notamment par détalonnage des portes intérieures). Ces arrêtés fixent de plus les exigences de débits d'air extrait minimum en pièces de service (Tableau V 1) et autorisent la modulation des débits en fonction des systèmes employés (Tableau V 2). Le renouvellement de l'air intérieur peut être assuré, selon les cas, par les défauts d'étanchéité, des grilles de ventilation et l'ouverture des fenêtres ou par des systèmes de ventilation naturelle ou mécanique contrôlée (VMC).

Figure 1 : Principe de la ventilation par pièce (à gauche) et par balayage des pièces principales vers les pièces de service (à droite) – source Bonnet (2011).

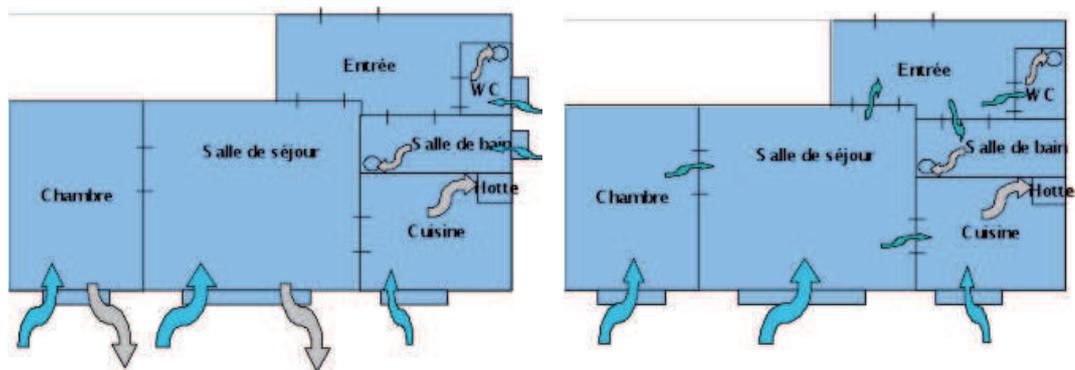


Tableau 1 : Débits extraits minimaux dans chaque pièce de service en fonction du nombre de pièces principales du logement (arrêté du 28 octobre 1983).

| Débits extraits (m ³ /h) C ^{dmc} | | | | | |
|--|---------|--|-------------------|---------------------|----------|
| Nombre de pièces principales du logement | Cuisine | Salle de bains ou de douches commune ou non avec un cabinet d'aisances | Autre salle d'eau | Cabinets d'aisances | |
| | | | | Unique | Multiple |
| 1 | 75 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 2 | 90 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 3 | 105 | 30 | 15 | 15 | 15 |
| 4 | 120 | 30 | 15 | 30 | 15 |
| 5 et plus | 135 | 30 | 15 | 30 | 15 |

Tableau 2 : Débits extraits minimaux dans chaque pièce de service en fonction du nombre de pièces principales du logement (arrêté du 28 octobre 1983) en présence d'un système de modulation des débits.

| Système | Nombre de pièces principales du logement | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------------|--|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| Manuel | Débit total minimal (m ³ /h) | 35 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 |
| | Débit minimal en cuisine (m ³ /h) | 20 | 30 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Automatique (hygro-réglable) | Débit total minimal (m ³ /h) | 10 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |

Les locaux à usage autres que d'habitations

Pour les locaux à usage autres que d'habitations, le Règlement Sanitaire Départemental Type prévoit les dispositions relatives à la ventilation dans les articles de 62 à 66 du titre III. En particulier, l'article 64 précise les débits minimaux à extraire variant de 18 à 25 m³/h par occupant en fonction du type des locaux (bureaux, locaux de vente, ateliers...) et avec interdiction de fumer. Depuis peu, le Code du Travail présente des débits minimaux revus à la hausse dans ses articles R. 4222-4 à R. 4222-6 du Titre 1^{er}, Chapitre II (Tableau 3). Ces deux règlements stipulent de plus certaines exigences comme la nécessité d'une distance minimale de huit mètres entre les prises d'air neuf et les ouvrants et toute source éventuelle de pollution, notamment les véhicules, les débouchés de conduits de fumée, les sorties d'air extrait...

Tableau 3 : Débits extraits minimaux dans les locaux autres que d'habitations (Code du Travail – Titre 1^{er}, Chapitre II 2008).

| Désignation des locaux | Débit minimal d'air neuf par occupant (m ³ /h) |
|--|---|
| Bureaux, locaux sans travail physique | 25 |
| Locaux de restauration, locaux de vente, locaux de réunion | 30 |
| Ateliers et locaux avec travail physique léger | 45 |
| Autres ateliers et locaux | 60 |

La Norme européenne NF EN 15251 (août 2007), en application de la Directive Performance énergétique des bâtiments (DPEB) (Directive 2002/91/CE), spécifie les paramètres relatifs à l'ambiance intérieure qui influent sur la performance énergétique des bâtiments. En particulier, cette norme présente des méthodes de calculs des débits de ventilation recommandés dans les bâtiments non résidentiels. En préambule, elle rappelle qu'il n'existe pas d'indice commun normalisé pour la qualité de l'air intérieur mais distingue cependant trois principes d'évaluation des débits de ventilation nécessaires à une bonne qualité de l'air : calcul de la ventilation requise pour l'occupation humaine et ajout de la ventilation requise pour les composants du bâtiment (émissions des matériaux), calcul du débit de ventilation requis par personne ou par mètre carré de surface au sol et calcul du débit de ventilation requis basé sur la conservation de la masse et les critères requis pour le niveau de CO₂. Par exemple, la seconde méthode de calcul permet de déterminer le débit d'air neuf recommandé en fonction du caractère polluant du bâtiment et du niveau de qualité d'air requis (Tableau V 4 et Tableau V 5).

Tableau 4 : Débits de ventilation recommandés pour les bâtiments non résidentiels pour trois catégories de pollution due au bâtiment lui-même (d'après NF EN 15251).

| Catégorie | Débit par personne (m ³ /h.pers) | Débit pour les pollutions dues aux émissions du bâtiment (m ³ /h.m ²) | | |
|-----------|---|--|-----------------------|------------------|
| | | Bâtiment très peu polluant | Bâtiment peu polluant | Autres bâtiments |
| I | 36,0 | 1,8 | 3,6 | 7,2 |
| II | 25,2 | 1,3 | 2,5 | 5,0 |
| III | 14,4 | 0,7 | 1,4 | 2,9 |

Tableau V 5 : Catégories de pollution due au bâtiment lui-même (d'après NF EN 15251).

| | Bâtiment très peu polluant Taux d'émission (µg/h.m ²) | Bâtiment peu polluant Taux d'émission (µg/h.m ²) |
|-----------------------|--|---|
| COVT | < 100 | < 200 |
| Formaldéhyde | < 20 | < 50 |
| Ammoniaque | < 10 | < 30 |
| Composés cancérogènes | < 2 | < 5 |
| Matériau inodore | insatisfaction < 10% | insatisfaction < 15% |

La rénovation

Les arrêtés du 13 juin 2008 et du 3 mai 2007 présentent certaines exigences en matière de ventilation lors de la rénovation des locaux. En ce qui concerne la réhabilitation des logements, les exigences réglementaires à appliquer sont normalement celles qui étaient en vigueur au moment de la date de dépôt de la demande du permis de construire. Cependant, la réglementation sur la performance énergétique impose que la rénovation des bâtiments de surfaces intérieures supérieures à 1000 m² respecte les débits minimaux les plus récents en considérant comme référence un système par extraction d'air prenant l'air directement à l'extérieur (arrêté du 13 juin 2008) et que la réhabilitation des autres bâtiments intègre l'amélioration de l'aération par ajout, si nécessaire, de bouches d'entrée d'air dans le cas, par exemple, d'un remplacement d'ouvrant (arrêté du 3 mai 2007). Pour les locaux à usage autre que d'habitation de surfaces intérieures supérieures à 1000 m², le système de référence est un système par insufflation et extraction d'air sans échangeur de chaleur et sans préchauffage d'air neuf et dont les débits entrant et sortant sont égaux pour les locaux à usage autre que d'habitation. Les débits à fournir et à reprendre sont égaux aux débits minimaux résultant des réglementations d'hygiène ou, à défaut, des débits spécifiques conventionnels définis dans les règles TH-C-E ex (arrêté du 13 juin 2008). Dans le cas de bâtiments ou de parties de bâtiments et faisant l'objet d'un remplacement ou de l'installation d'un système de ventilation pour une surface supérieure à 400 m², un dispositif permettra de gérer automatiquement les débits occupation-inoccupation (arrêté du 3 mai 2007).



Caisse des Dépôts
56, rue de Lille
75356 Paris 07 SP
www.caisseedepots.fr