



HAL
open science

Chapitre 3.2. Qualité des environnements intérieurs

Corinne Mandin, Philippe Glorennec, Nonvignon Marius Kêdoté, Marion Keirsbulck, Jean-Pierre Le Bourhis, Dorothée Marchand, Véronique Yoboué

► **To cite this version:**

Corinne Mandin, Philippe Glorennec, Nonvignon Marius Kêdoté, Marion Keirsbulck, Jean-Pierre Le Bourhis, et al.. Chapitre 3.2. Qualité des environnements intérieurs. Environnement et santé publique. Fondements et pratiques. Rennes, Presses de l'EHESP, " Références Santé Social ". Sous la direction de Isabelle Goupil-Sormany, Maximilien Debia, Philippe Glorennec, Jean-Paul Gonzalez, Nolwenn Noisel., Presses de l'EHESP, pp.575-596, 2023, 978-2-8109-1007-6. 10.3917/ehesp.goupi.2023.01.0575 . hal-04412042

HAL Id: hal-04412042

<https://hal.inrae.fr/hal-04412042>

Submitted on 23 Jan 2024

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.

Chapitre 3.2

Qualité des environnements intérieurs

Corinne Mandin, Philippe Glorennec, Nonvignon Marius Kêdoté, Marion Keirsbulck, Jean-Pierre Le Bourhis, Dorothee Marchand, Véronique Yoboué

Objectifs :

Connaître les principaux polluants de l'environnement intérieur (air et poussières) et leurs origines

Appréhender les spécificités de la pollution intérieure selon les lieux de vie

Cerner les enjeux sanitaires, économiques et de recherche, actuels et futurs

Identifier les solutions et leviers d'action, techniques, individuels et politiques

Si quelques problématiques spécifiques au bâtiment ont un historique plus important (peintures au plomb, amiante), la pollution intérieure ou, de façon plus positive, la qualité des environnements intérieurs s'est invitée dans l'arène scientifique puis le débat public depuis les années 1970. Du fait notamment de la prise de conscience du temps passé dans des environnements intérieurs et donc de l'importance de ces environnements en termes d'exposition, de nombreux travaux ont été menés pour améliorer les connaissances et définir des mesures de gestion et de prévention.

1. Pollution de l'environnement intérieur : de quoi parle-t-on ?

Dans cette première partie du chapitre, les différentes caractéristiques de la pollution intérieure sont présentées, sous l'angle de la nature de cette pollution, de ses sources, de ses spécificités par type de bâtiment ou encore de ses particularités géographiques. La qualité de l'air dans les infrastructures de transport (habitacles automobiles, trains, avions, métros) n'est pas abordée ici ; elle présente des spécificités en termes de nature et sources de polluants, de durée d'exposition et de moyens de gestion qui lui sont propres et nécessiteraient un chapitre à part entière.

1.1. Les différents groupes de polluants de l'environnement intérieur

On répertorie classiquement les polluants de l'environnement intérieur en trois groupes : les substances chimiques, les agents physiques et les agents biologiques.

Les **substances chimiques** peuvent être présentes dans l'air sous forme gazeuse ou particulaire. Selon leurs propriétés physico-chimiques notamment leur température d'ébullition ou pression de vapeur et d'après la série des normes ISO 16000, elles peuvent être classées comme étant très volatiles (elles s'évaporent rapidement dans l'air ; c'est par exemple le cas du formaldéhyde, polluant chimique ubiquitaire des environnements intérieurs), volatiles (on parle alors de COV, composé organique volatil) ou semi-volatiles (COSV). Les COV recouvrent de très nombreuses familles chimiques comme les composés aliphatiques (hexane, décane, undécane, par exemple), les hydrocarbures aromatiques monocycliques (benzène, toluène, xylènes, etc.), les terpènes (limonène, pinène, linalol, etc.) pour n'en citer que quelques-unes. A l'instar des COV, les COSV englobent un grand nombre de familles chimiques parmi lesquelles les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les phtalates, les bisphénols et alkylphénols, les perfluorés, les muscs de synthèse, les pyréthriinoïdes, les polychlorobiphényles (PCB), et de nombreuses autres substances bromées, phosphorées ou chlorées aux usages variés décrits plus loin dans ce chapitre ([Weschler et Nazaroff, 2008](#)). A ces substances chimiques organiques, il convient d'ajouter les gaz inorganiques : monoxyde de carbone (CO), dioxyde d'azote (NO₂), dioxyde de soufre (SO₂) et ozone (O₃).

Les **agents biologiques** incluent les moisissures, bactéries, virus, allergènes, notamment d'acariens et d'animaux domestiques, et les pollens. Les moisissures sont des champignons microscopiques pouvant coloniser des supports de nature variée (bois, papier peint, tissus, etc.) pour peu qu'ils y trouvent une humidité favorable et suffisamment d'éléments nutritifs. Elles peuvent libérer dans l'air des spores et des substances odorantes (odeur de moisi), voire toxiques comme les mycotoxines. Parmi les bactéries présentes dans l'air intérieur, la plus connue est probablement *Legionella*. Dans les réseaux d'eau des bâtiments, les légionelles peuvent se trouver dans des conditions de température favorables à leur prolifération. Elles peuvent être mises en suspension dans l'air associées à des gouttelettes d'eau formées par la douche ou la cuisine. Tous les agents biologiques ne sont pas nécessairement considérés comme des polluants néfastes à la santé ; de nombreux travaux, issus en particulier de la thèse hygiéniste, ont montré les bénéfices liés à une exposition précoce à un riche microbiote environnemental (NAS, 2017).

Enfin, les **agents physiques** correspondent aux polluants dont l'action sur le vivant est liée à leur forme ou leurs rayonnements, ionisants ou non. Ils intègrent les particules, les fibres, qu'il s'agisse de fibres minérales naturelles comme l'amiante ou de fibres artificielles (laine de verre, laine de roche), le radon, gaz radioactif, ou les champs électromagnétiques. Les particules en suspension dans l'air sont des composés solides ou liquides qui constituent un mélange hétérogène, tant en taille qu'en composition chimique. La composition chimique des particules dans l'air intérieur est peu documentée car sa détermination est relativement coûteuse. A l'instar de l'air extérieur, les particules dans l'air intérieur sont donc le plus souvent caractérisées selon leur taille (ou diamètre) : particules totales en suspension (TSP) ; particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm (PM₁₀) ; particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 µm (PM_{2,5}) ou particules fines ; particules submicroniques de diamètre aérodynamique médian inférieur à 1 µm ; et enfin particules ultrafines de diamètre inférieur à 100 nm, également appelées nanoparticules. Le terme de nanoparticules est réservé aux particules émises par des matériaux dans lesquels des éléments de taille nanométrique ont été spécifiquement intégrés afin de leur conférer des propriétés particulières.

Au-delà de ces trois catégories de polluants, on peut citer la fumée de tabac environnementale qui représente la principale des pollutions intérieures. Elle contient plus de 3 000 substances chimiques présentes sous forme de gaz ou particules (benzène, métaux lourds, HAP, formaldéhyde, monoxyde de carbone, cyanure d'hydrogène, oxydes d'azote, etc.).

Depuis plusieurs années la notion de qualité de l'air intérieur est élargie à l'environnement intérieur au sens large, notamment considérant les **poussières déposées sur les surfaces** (sol, meubles, etc.) qui peuvent être contaminées par érosion des matériaux et des produits ou par condensation de COSV présents dans l'air. Ces poussières contiennent également les substances chimiques non volatiles, en particulier les métaux et autres éléments traces (Ibanez et al., 2010). Au Canada, la contamination des poussières est d'ailleurs évaluée via une étude nationale représentative (Rasmussen et al., 2013).

1.2. Les différentes catégories de sources de pollution intérieure

La pollution intérieure peut également être décrite selon les trois types de sources généralement considérés :

- la **pollution extérieure** qu'il s'agisse de l'air extérieur ou du sol sous-jacent au bâtiment, dans le cas du radon émis par les sols principalement granitiques et volcaniques, ou des COV émis par les sols pollués par des activités industrielles passées ou actuelles ;
- les **constituants du bâtiment** : matériaux de construction et revêtements – sol, murs, plafond –, ses équipements, notamment de chauffage, et mobilier. Ainsi les appareils de cuisson ou

chauffage à combustible liquide ou solide mal entretenus ou mal raccordés peuvent émettre du monoxyde de carbone ;

- les **occupants eux-mêmes (bioeffluents) et leurs activités** (cuisson, tabagisme, nettoyage, utilisation de désodorisants d'ambiance, combustion de bougies et d'encens, bricolage, hygiène corporelle, soin des plantes et des animaux domestiques, etc.).

Les COSV proviennent par exemple des revêtements de sol plastifiés (cas des phtalates), des textiles d'ameublement, des appareils électriques et électroniques (retardateurs de flamme polybromés ou phosphorés) ou des traitements insecticides (pyréthrinoïdes). Ils peuvent être utilisés dans des objets du quotidien très divers pour leurs différentes propriétés (antiadhésive ou antisalissure, par exemple, dans le cas des composés fluorés). Les PCB ne sont aujourd'hui plus autorisés, mais ils peuvent encore être émis par des joints d'étanchéité utilisés dans les années 1970, encore en place dans les bâtiments. Les particules viennent essentiellement des phénomènes de combustion, qu'il s'agisse du trafic routier extérieur ou de combustions intérieures (cuisson, encens et bougies, tabagisme).

La détermination des **parts contributives des différentes catégories de sources** aux concentrations intérieures est généralement difficile, non seulement du fait des spécificités de chaque polluant et chaque environnement, mais aussi en raison de la variabilité spatio-temporelle des concentrations intérieures et des phénomènes de réactivité chimique conduisant à la formation de polluants secondaires (cas des terpènes et de l'ozone générant du formaldéhyde et des particules ultrafines, par exemple) ou à la disparition d'autres substances, par adsorption sur les surfaces, par exemple. La réactivité des polluants de l'air intérieur a d'ailleurs fait l'objet de très nombreux travaux de recherche ces dernières années ([Weschler et Carslaw, 2018](#)).

Au titre des déterminants de la pollution intérieure, outre les sources elles-mêmes, on intègre les **conditions hygrothermiques et le renouvellement de l'air**, qui constituent des paramètres ayant une influence majeure sur les concentrations intérieures. L'augmentation de l'humidité peut favoriser le développement des moisissures, la prolifération des acariens et les émissions de substances chimiques par les matériaux. Ces dernières augmentent également avec la température. Le renouvellement d'air joue un rôle essentiel dans la qualité de l'air intérieur : il assure la dilution et l'évacuation des polluants et de l'humidité. Un air insuffisamment renouvelé est dit confiné. Il existe trois contributeurs au renouvellement de l'air : 1) l'ouverture des portes et fenêtres (on parle alors d'aération), 2) le système de ventilation : mécanisé (ventilation mécanique contrôlée ou VMC), non mécanisé (ventilation par tirage thermique) ou hybride, et 3) les fuites d'air parasites.

1.3. Les spécificités selon les lieux de vie

La pollution intérieure varie selon les types de bâtiment. **Les logements** sont les lieux dans lesquels on trouve les sources de pollution intérieure les plus variées et potentiellement toutes les sources citées précédemment. Parmi les spécificités de ces bâtiments, on peut citer, par exemple, la présence d'un garage attenant et communicant, qui augmente les concentrations dans l'air de la maison de certains polluants émis par les voitures (gaz d'échappement et réservoirs) et les produits de bricolage pouvant être stockés dans ce garage. Les activités de cuisson, de soin et d'hygiène (douche, séchage du linge) peuvent contribuer à introduire une forte humidité dans le logement. Alors que le tabagisme n'est plus autorisé dans les lieux publics dans de nombreux pays, il constitue une spécificité du logement.

Dans **les écoles**, la densité de mobilier importante, l'utilisation de produits pour les activités (colles, peintures, feutres, etc.) et le nettoyage fréquent des locaux peuvent affecter la qualité de l'air intérieur et constituent des spécificités propres à ces lieux en comparaison des logements. L'utilisation de craie, la proximité de routes desservant l'établissement et la forte activité des enfants, qui génère la remise en suspension des poussières déposées au sol, sont des facteurs qui contribuent à la pollution en particules dans l'air des salles de classe. Par ailleurs, ces bâtiments sont

connus pour présenter un mauvais renouvellement de l'air dans de nombreux pays (Fisk, 2017). Dans **les crèches**, les activités de change et de soin des bébés, ainsi que le ménage très fréquent y compris dans la journée en présence des enfants, peuvent produire une pollution supplémentaire (Wei et al., 2016).

Dans **les immeubles de bureaux**, les ordinateurs, imprimantes et photocopieurs peuvent émettre des COV, de l'ozone et des particules fines et ultrafines (Cacho et al., 2013). Par ailleurs, l'utilisation de produits d'entretien, potentiellement émetteurs de COV du type alcools, terpènes, éthers de glycols, cétones, etc., est fréquente dans les espaces de bureaux.

Bien que moins fréquentés à l'échelle individuelle que les espaces précédemment décrits, les lieux de loisirs et locaux sportifs méritent une attention particulière du fait de pollutions spécifiques. Dans les **piscines couvertes**, le problème majeur de qualité d'air provient de la réaction entre les produits de désinfection (chlore principalement) et les substances d'origine organique apportées par les baigneurs via la sueur, la salive, etc. Cette réaction donne naissance à des dérivés halogénés présents à la fois dans l'eau et dans l'air. Leurs concentrations sont très variables et augmentent avec le nombre de baigneurs, la température de l'eau et de l'air, le degré de désinfection et la mauvaise ventilation. S'agissant des **gymnases**, les problématiques abordées dans les rares publications sur le sujet sont la biocontamination, la pollution particulaire liée à l'utilisation de magnésite ou à la remise en suspension des poussières au sol du fait des activités intenses et la contribution des émissions des revêtements de sol synthétiques, parfois issus du recyclage d'autres matériaux.

1.4. Qualité de l'air intérieur : une problématique mondiale mais des spécificités géographiques

En raison des faibles niveaux d'accès aux énergies modernes, au moins 95 % des ménages de 18 pays africains utilisent la biomasse (bois, charbon de bois, résidus agricoles, etc.) pour cuisiner, selon une enquête menée en 2016 par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (OMS, 2016). Or la combustion de biomasse dans les fours de cuisson traditionnels émet des concentrations élevées de particules et de nombreux autres polluants, notamment du dioxyde de soufre, des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone pouvant atteindre des concentrations intérieures particulièrement nocives pour la santé (Abera et al., 2021). Les travaux sur la pollution de l'air intérieur due aux feux domestiques chez des ménages de Côte d'Ivoire en témoignent. En effet, des mesures *in situ* de concentrations de polluants et des enquêtes de terrain sur les quantités de combustibles fossiles (bois, charbon de bois et gaz butane) utilisées par ménage ont été réalisées. Les résultats ont montré une forte utilisation de ces sources d'énergie dans les ménages et une contribution forte à la pollution de l'air intérieur. Par exemple, les facteurs d'émission en carbone organique sont de $15,6 \pm 6,4$ g/kg et $6,5 \pm 2,0$ g/kg pour l'hévéa, le plus couramment utilisé car moins cher, et l'Iroko, respectivement (Keita et al., 2018). D'après des travaux récents menés au Burkina-Faso et en Côte d'Ivoire, environ 60 % des ménages utilisent la biomasse (bois ou charbon de bois) comme principal combustible (Kafando et al., 2018 ; Kouao et al., 2019). Des concentrations moyennes quotidiennes en PM_{2,5} à l'intérieur des bâtiments bien supérieures à la valeur recommandée par l'OMS ont également été observées lors de ces études. Le nombre de fenêtres dans les chambres à coucher et la situation des cuisines à l'extérieur étaient négativement corrélées à la concentration intérieure en PM_{2,5}.

Par ailleurs, la pollution intérieure est plus prononcée dans les quartiers à faible revenu des villes selon une étude menée au Ghana, et les femmes ainsi que leurs jeunes enfants sont exposés à des concentrations plus élevées et pendant des durées plus longues que les hommes (Mir Alvarez et al., 2020). Selon des travaux menés en Ouganda et en Ethiopie, les femmes étaient exposées à des concentrations en PM_{2,5} sept fois plus élevées que celles auxquelles les hommes étaient exposés (Abera et al., 2021), montrant une inégalité d'exposition aux polluants. De même, les niveaux d'exposition au benzène à Dakar étaient plus élevés chez les femmes de ménage que chez les

conducteurs d'autobus et les commerçants dans une étude sur l'exposition individuelle (Ndong Ba et al., 2019). Cette exposition élevée au benzène dans les locaux est due aux habitudes de cuisson (au charbon de bois), aux pratiques locales (brûlage d'encens), à l'utilisation de produits de nettoyage ou de solvants qui sont des émetteurs importants de ce composé au Sénégal (Ndong Ba et al., 2019).

1.5. Des expositions multivoies

L'exposition aux polluants de l'environnement intérieur ne se fait pas que par inhalation. La population est également exposée par ingestion des poussières déposées sur les sols et surfaces, en particulier les jeunes enfants du fait des contacts main-bouche fréquents, et par exposition cutanée, en particulier aux polluants en phase gazeuse.

La contribution de l'**ingestion de poussières** est connue depuis longtemps pour le plomb ; Lanphear et al. (1998) aux États-Unis, Levallois et al. (2014) au Québec et Etchevers et al. (2015) en France ont observé une corrélation significative entre les concentrations en plomb des poussières domestiques et les plombémies infantiles. Une revue (Larsson et Berglund, 2018) indique que cette exposition peut concerner d'autres composés, dont les COSV, qui se condensent sur les surfaces dont les poussières qui peuvent ensuite être ingérées par contact main-bouche. Les auteurs montrent que l'ingestion de poussières peut être un contributeur important à l'exposition pour les retardateurs de flamme bromés, certains phtalates et hydrocarbures aromatiques polycycliques et pour le plomb. Toujours dans cette revue, une corrélation significative est rapportée entre les concentrations dans les poussières et les matrices biologiques pour quelques retardateurs de flamme organophosphorés et le plomb. En France, parmi les métaux et métalloïdes, le plomb semble être le seul pour lequel l'ingestion de poussières constitue une source d'exposition pouvant dépasser la contribution de l'alimentation pour les enfants les plus exposés (Glorennec et al., 2016). Pelletier et al. (2017) ont montré que l'ingestion de poussières représentait la majorité de l'exposition résidentielle pour trois phtalates et un polychlorobiphényle parmi 32 COSV communément présents dans les logements en France. Pour ces derniers, l'exposition résidentielle pouvait d'ailleurs représenter une exposition comparable à l'exposition alimentaire.

L'**exposition cutanée** a été documentée plus récemment, expérimentalement et par modélisation, et s'avère non négligeable pour certains COSV à faible masse moléculaire (Weschler et Nazaroff, 2014). Corollairement, des travaux expérimentaux ont montré le rôle des vêtements dans l'exposition cutanée aux polluants de l'air intérieur (Licina et al., 2019) : si les vêtements peuvent être protecteurs, ils peuvent également, dans certaines conditions, adsorber les polluants présents dans l'air et être ensuite le vecteur de leur transmission par le contact avec la peau.

1.6. Une thématique qui n'est pas nouvelle mais évolue sans cesse

Si la qualité de l'air intérieur a été mise en lumière par la pandémie de COVID-19, ce n'est pas pour autant un sujet nouveau. Les premières recherches datent des années 1970 lorsque la première crise pétrolière a incité à l'isolation des bâtiments pour économiser l'énergie et que le développement parallèle des matériaux et produits de grande consommation issus de la chimie de synthèse a conduit à se questionner sur la qualité de l'air dans les bâtiments. En 1983, l'OMS a qualifié l'apparition de symptômes possiblement en lien avec une dégradation de la qualité de l'air intérieur de « syndrome des bâtiments malsains » (OMS, 1983). L'amiante, la *Legionella*, le formaldéhyde et le radon ont été parmi les premiers polluants étudiés. En 1989, la Commission européenne a publié le premier rapport, dédié au radon dans l'air intérieur, d'une série de 29 rapports de référence produits par l'« action concertée sur la qualité de l'air intérieur et son impact sur l'humain » (EC, 1989). En 1992, la société savante internationale dédiée à la qualité de l'air intérieur (ISIAQ, *International Society for Indoor Air Quality and Climate*) est créée par un groupe de 109 chercheurs du monde entier. Les COV et leurs émissions par les matériaux de construction vont ensuite faire l'objet de nombreux travaux

dans les années 1990-2000, avant que les études soient élargies aux COSV, aux agents biologiques et à d'autres sources d'émission à partir des années 2000. Les poussières intérieures sont apparues comme étant une matrice d'exposition importante dans les bâtiments, tout comme l'ingestion et la voie cutanée ont été jugées d'intérêt en plus du seul focus sur l'inhalation. Plus récemment, des méthodes nouvelles comme les techniques analytiques dites non ciblées, l'usage des biomarqueurs d'exposition, le recours aux capteurs connectés de mesure en continu, par exemple, sont utilisées pour la recherche sur la pollution de l'environnement intérieur et ses effets sur la santé humaine. Désormais l'exposition aux polluants de l'environnement intérieur a pris sa place dans le concept d'exposome et de santé globale, et la qualité de l'air intérieur est prise en compte dans l'ensemble des certifications relatives aux « bâtiments durables » dans le monde (Wei et al., 2015).

2. Pollution de l'environnement intérieur et santé

Dans cette deuxième partie du chapitre, sont présentés les principaux effets sur la santé des polluants de l'air intérieur et les évaluations du poids des maladies associées réalisées à ce jour. Outre des effets sur la santé humaine, la pollution de l'environnement intérieur peut également avoir des effets sur l'apprentissage des enfants à l'école et la performance au travail dans les bâtiments de bureaux. Enfin, la notion de « valeur guide de qualité de l'air intérieur » est présentée dans un encadré dédié.

2.1. Les effets sur la santé des polluants de l'environnement intérieur

Les effets sur la santé humaine de certains polluants de l'environnement intérieur sont bien établis : le monoxyde de carbone peut conduire à l'intoxication oxycarbonée mortelle, l'amiante est associé au mésothéliome, le plomb au saturnisme et le radon au cancer du poumon. De façon générale, les effets sanitaires sont tout aussi variés que les polluants qui en sont la cause. Une synthèse succincte de ces effets est présentée ici ; le lecteur pourra approfondir le sujet avec des articles de revue plus complets (Annesi-Maesano et al., 2013 ; Wolkoff, 2013 ; Vardoulakis et al., 2020).

De nombreuses études épidémiologiques sont disponibles pour le **NO₂** présent dans l'air intérieur. Elles mettent en évidence des effets respiratoires : hyperréactivités bronchiques et inflammations des voies aériennes, ainsi qu'une baisse des défenses immunitaires à l'origine d'une susceptibilité accrue d'infections respiratoires (OMS, 2010).

Les **COV et aldéhydes** sont le plus souvent à l'origine d'irritations des yeux et des voies respiratoires (Viegi et al., 2004). Le benzène est classé comme cancérigène certain chez l'Homme par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) et l'Union européenne. Le formaldéhyde est également classé cancérigène certain chez l'Homme par le CIRC. Cependant, aux concentrations habituellement rencontrées dans l'air intérieur, ce sont ses effets d'irritation des muqueuses qui sont en jeu (OMS, 2010). Certains COV sont par ailleurs reconnus neurotoxiques ou reprotoxiques, pouvant altérer les fonctions de reproduction ou induire des effets néfastes non héréditaires sur la descendance. De même, certains **COSV** sont suspectés d'avoir des effets sur le système nerveux ou le système immunitaire, ou d'être des perturbateurs endocriniens, ce qui peut entraîner des effets sur le système reproducteur (baisse de la fertilité, malformation, cancer, etc.) ou l'augmentation de l'obésité (Rudel et Perovich, 2009).

Les **PM_{2,5} et PM₁₀** ont des effets respiratoires et cardio-vasculaires largement mis en évidence par les études épidémiologiques relatives à la pollution atmosphérique urbaine, qui intègrent de fait la part du temps passé par la population dans les bâtiments. La composition chimique des particules est également déterminante en termes d'effets sur la santé et une part des particules présentes dans l'air intérieur ont des sources spécifiques et sont donc à ce titre de compositions différentes des particules provenant de l'air extérieur. Cependant, les effets sanitaires propres à ces particules de sources intérieures restent peu caractérisés à ce jour (NAS, 2016 ; Morawska et al., 2016).

Dans le champ de la **pollution biologique**, les allergènes domestiques (d'acariens, de chat, de chien) sont susceptibles d'entraîner des réactions allergiques chez les personnes sensibilisées. De même, les moisissures sont également reconnues pour avoir des effets respiratoires incluant le développement et l'exacerbation de l'asthme chez les enfants et les adultes exposés sur leur lieu de travail et la rhinite allergique (Anses, 2016).

S'agissant de la problématique spécifique de la **combustion domestique de biomasse**, de nombreuses études ont permis d'établir une relation causale entre les fumées de cette combustion et des pathologies de l'appareil respiratoire (infections aiguës des voies respiratoires, notamment pneumonie, broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) et cancer du poumon) et des petits poids de naissance chez les enfants des mères exposées (OMS, 2016).

Enfin, le **syndrome des bâtiments malsains** est défini par l'OMS (1983) comme un excès de plaintes et de symptômes non spécifiques (céphalées, troubles de la concentration, asthénie, irritation cutanée ou des muqueuses nasales, oculaires et des voies aériennes supérieures) survenant chez des occupants de bâtiments non industriels (i.e. sans pollution spécifique). Les nombreuses études conduites dans le monde sur le sujet soulignent par ailleurs le caractère multifactoriel de ce syndrome : à de possibles causes environnementales (présence de COV et de biocontaminants, bruit, luminosité insuffisante, ventilation défectueuse) s'ajoutent des facteurs socioprofessionnels et psychologiques.

2.2. Impacts sanitaires et socio-économiques

Le calcul des impacts sanitaires permet de quantifier à l'échelle d'une population le nombre de pathologies en lien avec le facteur de risque considéré (voir chapitre épidémiologie). De tels calculs permettent de cerner l'ampleur d'un problème de santé publique et constituent un préalable à la hiérarchisation de mesures destinées à réduire ce problème. Ils ont été réalisés dans plusieurs pays ou région (Pays-Bas, France, Californie), ainsi qu'à l'échelle européenne pour calculer ce « poids des maladies » lié à la pollution intérieure (Hänninen et al., 2014 ; Boulanger et al., 2017). A l'échelle internationale, la *Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study* (GBD) intègre à ce jour uniquement la pollution de l'air intérieur liée à la combustion de combustibles fossiles solides dans les pays en voie de développement (GBD, 2019). Les résultats sont difficilement comparables puisque les études incluent des polluants et des effets sanitaires différents.

Au-delà de l'impact, le plus souvent exprimé en DALY (*Disability Adjusted Life Years*), à savoir le nombre cumulé d'années perdues du fait d'une mauvaise santé, d'un handicap ou d'une mort prématurée, certaines études ont évalué le coût financier lié à ces impacts. Ainsi, le bureau de l'air en Californie a évalué à 45 milliards de dollars par an, pour l'année 2000 prise en référence, le coût de la pollution de l'air intérieur (pour 34 millions d'habitants en Californie en 2000). En France, ce coût a été évalué à 19 milliards d'euros par an, pour l'année 2004 prise en référence (61 millions d'habitants) (Boulanger et al., 2017).

2.3. Influence sur l'apprentissage scolaire ou la productivité au travail : d'autres conséquences à ne pas négliger

Outre les effets sur la santé, une dégradation de la qualité de l'air intérieur peut également avoir des répercussions négatives sur l'apprentissage scolaire et la performance au travail.

Dans les écoles, les études menées se sont intéressées aux relations entre la performance scolaire et les concentrations intérieures en dioxyde de carbone (CO₂), indicateur du confinement, utilisé pour le calcul du taux de renouvellement d'air et proxy d'une mauvaise qualité de l'air intérieur (Brink et al., 2021). Les concentrations intérieures d'autres polluants n'ont pas été mesurées dans les études recensées, tandis que d'autres paramètres comme la température, l'acoustique et l'éclairage étaient

considérés. La performance scolaire est évaluée au travers d'exercices de logique, de lecture et de calcul, via le suivi des notes, ou à partir de l'observation des comportements des élèves. De faibles débits d'air et des concentrations élevées en CO₂ ont été significativement associés à une moindre performance scolaire, ainsi qu'à un plus fort absentéisme des élèves.

S'agissant des espaces de bureaux, de nombreuses études ont été menées en conditions contrôlées (Wargocki et Wyon, 2017). Elles ont montré que la température, le taux de renouvellement d'air, le bruit ou l'éclairage pouvaient avoir une influence sur la rapidité à effectuer certaines tâches et/ou à les réaliser correctement. Ces facteurs ont aussi été associés au nombre d'arrêts de travail de courte durée. A noter que la plupart de ces études ont été conduites dans des pièces simulant des bureaux, non nécessairement représentatives des situations réelles d'exposition, avec de petits groupes de personnes et/ou étaient basées sur une auto-évaluation de la performance.

Encadré

Valeurs guides de qualité de l'air intérieur : des repères sanitaires ou d'action

Une valeur guide de qualité de l'air intérieur (VGAI) correspond à une concentration en dessous de laquelle aucun effet sanitaire ou aucune nuisance ayant une répercussion sur la santé n'est attendu pour la population générale ou une concentration associée à une probabilité de survenue d'un effet. Ces valeurs guides visent à protéger l'ensemble de la population générale, incluant les personnes les plus sensibles, des nourrissons aux personnes âgées.

Les VGAI permettent de qualifier un environnement intérieur vis-à-vis des concentrations mesurées dans l'air pendant une durée donnée. Certaines valeurs guides concernant les poussières intérieures ont été proposées pour le plomb et le pentachlorophénol et mériteraient d'être élargies à d'autres substances (Glorennec et al., 2021).

Dans l'objectif de réduire les concentrations des polluants de l'air intérieur et ainsi de protéger la santé des populations, les premières VGAI ont été proposées dans les années 1980. Les expériences sont depuis nombreuses. On peut citer en Europe : Allemagne, Autriche, Belgique, Finlande, France, Pays-Bas, Portugal et Royaume-Uni, en Amérique : Canada et États-Unis et en Asie : Chine, Hong Kong et Japon. Selon les pays, les VGAI existantes ne concernent pas nécessairement les mêmes substances et, pour une même substance, elles peuvent être différentes du fait de leur mode de construction (le plus souvent reposant sur des critères sanitaires avec intégration ou non de critères de gestion), de l'état des connaissances sur les effets sanitaires de la substance, des populations ciblées, etc.

A l'échelle supranationale, l'OMS fait référence pour la publication de valeurs guides. Elle a publié en 2009, son premier rapport présentant des lignes directrices relatives à l'humidité et aux moisissures dans les bâtiments (OMS, 2009). Le deuxième rapport de la série était consacré à une liste de neuf substances ou familles de substances chimiques pour lesquelles des valeurs guides ont été définies en 2010 (OMS, 2010). Le dernier rapport, publié en 2014, traitait des sources de combustion à domicile en lien avec les activités de cuisson et de chauffage, représentant un fardeau sanitaire important dans le monde (OMS, 2014). Un comité technique de l'ISIAQ a mis en ligne en 2021 un site web évolutif recensant les valeurs guides de qualité de l'environnement intérieur proposées dans le monde : <https://ieqguidelines.org/>.

Certaines VGAI ont une portée réglementaire et correspondent à des valeurs de gestion pouvant intégrer des considérations économiques ou techniques, tandis que d'autres sont des valeurs établies exclusivement sur des critères sanitaires et restent indicatives. Par exemple, une concentration limite en radon dans l'air l'intérieur des bâtiments a été définie réglementairement pour les pays de l'Union européenne n'excédant pas 300 becquerels par mètre cube (Bq.m⁻³).

(Directive n°2013-59 EURATOM), tandis que l'OMS a proposé en 2010 un niveau de référence à 100 Bq.m⁻³ pour réduire les risques sur la santé liés à l'exposition au radon (OMS, 2010).

3. Quelles solutions pour améliorer la qualité de l'air intérieur ?

Cette dernière partie du chapitre présente les différents leviers mobilisables pour améliorer la qualité de l'air intérieur, à l'échelle individuelle ou collective.

3.1. Solutions techniques

Trois grands axes d'amélioration de la qualité de l'air intérieur sont généralement mis en avant.

Réduire les émissions de polluants dans les bâtiments

L'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe par l'utilisation de produits et de matériaux faiblement émissifs. Dans plusieurs pays, des réglementations ou démarches volontaires sont en place pour que certains produits soient évalués au regard de leurs émissions de COV, puis soit étiquetés, soit non mis sur le marché en cas d'émissions élevées ou d'émissions de substances dangereuses. Des normes internationales (série des normes ISO 16000) existent pour définir les mesures des émissions de COV par les matériaux de construction et produits de décoration en chambre d'essai. La Figure 1 illustre l'étiquette qui doit obligatoirement figurer sur ces produits en France depuis 2013.

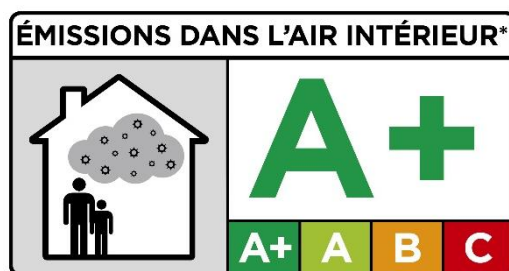


Figure 1. Étiquette indiquant la classe d'émission en composés organiques volatils d'un matériau ou produit de construction ou de décoration mis sur le marché en France.

A défaut d'étiquetage sur les émissions pour choisir les produits, il convient de respecter les dosages et les consignes d'utilisation, qui requièrent souvent une aération plus importante des locaux pendant leur usage. Il convient également de ne pas accumuler de produits pouvant émettre des COV dans les espaces de vie, d'aérer correctement les locaux de stockage le cas échéant, et enfin d'être vigilant lors de l'utilisation de produits nocifs, inflammables, corrosifs ou toxiques selon les symboles de danger présents sur les étiquettes.

D'autres actions sont également essentielles pour garantir la qualité de l'air des espaces clos. Ainsi l'entretien régulier des appareils à combustion pour le chauffage et la production d'eau chaude est nécessaire pour limiter les émissions de polluants tels que le monoxyde de carbone. La gestion des pathologies du bâtiment comme les dégâts des eaux, les infiltrations d'eau et les remontées capillaires est aussi essentielle pour limiter la présence d'humidité et les contaminations fongiques associées.

Garantir le renouvellement de l'air des locaux

La deuxième voie d'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe par le renouvellement de l'air permis par l'aération (ouverture des fenêtres) et la ventilation (présence d'un système).

Les systèmes mécaniques de ventilation doivent être correctement dimensionnés, installés et maintenus. Les orifices d'entrée d'air, tout comme les bouches d'extraction, ne doivent jamais être obturés. Les prises d'air des systèmes qui apportent mécaniquement de l'air doivent être éloignées de toute source de pollution extérieure : trafic routier ou rejet de parking souterrain si prise d'air en façade, tour aérorefrigérante ou cheminée d'une chaufferie si prise d'air en toiture. Les filtres doivent être régulièrement nettoyés ou changés.

Dans les locaux sans système de ventilation, il faut sensibiliser les occupants à aérer plusieurs fois par jour, y compris en présence des enfants dans les crèches et les écoles. Pour de multiples raisons (bruit extérieur, confort thermique, sécurité, économie d'énergie), l'ouverture régulière des fenêtres n'est pas toujours pratiquée. Le recours à un capteur grand public de mesure de la qualité de l'air peut être un outil pour y penser. La pandémie de COVID-19 a ainsi vu se développer l'usage de capteurs de mesure du CO₂. En effet, émis par les occupants d'un espace clos, le CO₂ est un marqueur du confinement de l'air de ce dernier. Une concentration élevée en CO₂ dans une pièce indique une mauvaise adéquation du renouvellement de l'air de ce local à sa densité d'occupation. Corollairement, ce renouvellement de l'air inadéquat implique une dégradation de la qualité de l'air intérieur puisqu'à l'instar du CO₂, les autres substances présentes dans l'air ne sont pas évacuées.

La pandémie de COVID-19 a mis en évidence l'insuffisance du renouvellement de l'air dans de nombreux bâtiments. Des chercheurs ont appelé à un nouveau paradigme : à l'instar de la fourniture d'eau potable, tout bâtiment doit garantir un air sain à ses occupants ([Morawska et al., 2021](#)).

Épurer l'air intérieur

L'épuration de l'air intérieur au moyen d'appareils autonomes n'a jamais été mise en avant par la communauté scientifique comme un moyen satisfaisant de garantir une bonne qualité de l'air dans les bâtiments et d'améliorer la santé de ses occupants. L'efficacité et l'innocuité des différentes technologies ont rarement été démontrées en conditions réelles d'usage. S'il existe une norme française pour évaluer l'efficacité et l'innocuité des dispositifs autonomes d'épuration de l'air intérieur (norme NF B44-200, Mai 2016), les produits mis sur le marché ne sont pas tous testés. Avec la pandémie de COVID-19, la question de l'utilisation des épurateurs d'air intérieur a pris de l'ampleur. En France, le Haut Conseil de la santé publique, dans son avis du 14 mai 2021 « relatif au recours à des unités mobiles de purification de l'air dans le cadre de la maîtrise de la diffusion du SARS-CoV-2 dans les espaces clos », rappelle que l'utilisation de tels épurateurs doit être envisagée uniquement quand ni l'aération, ni la ventilation du local ne sont possibles ou suffisantes. Si de tels appareils sont utilisés, il doit s'agir de dispositifs par filtration à haute efficacité et une étude en conditions réelles doit avoir été menée au préalable.

S'agissant de l'épuration de l'air intérieur, on peut aussi mentionner l'utilisation de plantes en pot, largement mise en avant suite aux travaux de la NASA dans les années 1970. En laboratoire, sous des conditions contrôlées et avec de fortes concentrations de polluants, certains végétaux ont en effet montré leur capacité à éliminer des polluants gazeux. Mais en conditions réelles, à savoir en présence d'un mélange de substances en faibles concentrations dans un volume d'air important à traiter, les plantes en pot ne sont pas capables d'éliminer les polluants de l'air intérieur.

3.2. Sensibilisation des occupants

La question de la sensibilisation des occupants suppose une démarche complexe de communication sur des informations relatives à des risques, d'appropriation de ces informations et de propositions de moyens permettant aux personnes ciblées de faire face à ces risques. Avant la pandémie de COVID-19, [Marchand et al. \(2018\)](#) ont montré que la qualité de l'air intérieur était un objet mal connu voire méconnu en dehors de l'expertise. Du point de vue des représentations, l'air intérieur et sa qualité étaient décrits comme des sujets insuffisamment débattus au sein de la population générale pour qu'un enjeu y soit constitué. L'assimilation des informations sensorielles (bonnes ou

mauvaises odeurs) à une qualité sanitaire, l'imperceptibilité de l'air, le manque de connaissances, les croyances et incertitudes (par exemple aérer revient à faire entrer la pollution extérieure, les encens purifient l'air, etc.) sont autant de facteurs qui concourent à la difficulté de communiquer sur cet objet.

Les périodes de confinement et les débats qui ont accompagné la pandémie de COVID-19 auront peut-être permis de davantage porter à connaissance cette problématique. Il convient donc de comprendre les ressorts d'une culture du risque sanitaire liée à l'air intérieur pour le grand public. Pour qu'une personne puisse s'adapter à un risque, il faut qu'elle en prenne conscience, puisse en construire une connaissance contextualisée, évaluer sa propre vulnérabilité et disposer de ressources pour réduire son exposition à cette pollution. Le contexte est important en induisant une relation différente entre la personne et son environnement ; les représentations, les comportements et les leviers d'actions varient en fonction de cette relation. Ainsi, pour penser le rapport à l'air intérieur dans un lieu spécifique comme le domicile, il faut avant tout penser le rapport au chez-soi envisagé comme un espace de sécurité, de protection contre les agressions et nuisances environnementales. Envisager un air intérieur délétère et menaçant peut conduire à du déni ou à une relégation du risque dans une hiérarchie des priorités à prendre en compte. Il convient donc d'accompagner le discours sur le risque de solutions permettant de réduire la vulnérabilité face à celui-ci.

Prévention et promotion (voir le chapitre correspondant) : deux alternatives sont possibles pour faire évoluer un comportement vers un comportement adaptatif. Un message incitant à l'adoption d'un comportement peut avoir plus ou moins d'impact selon la façon dont il est présenté. Le modèle de [Kahneman et Tversky \(1979\)](#), largement utilisé en psychologie de la santé et de la communication, montre les effets du type de cadrage sur l'efficacité des messages. Le cadre d'un message peut être positif ou négatif, c'est-à-dire basé sur la perte ou le gain. En d'autres termes, le message cible sur ce que l'on perd à ne pas adopter le comportement ou sur ce que l'on gagne si on l'adopte. Les diverses options qu'offrent le message persuasif et ses recommandations sont perçues par les individus en termes de gains ou de pertes, puis comme un jugement de valeur sur les diverses alternatives. Les gains sont valorisés puisqu'ils correspondent à l'évocation du plaisir, matériel, symbolique ou émotionnel, tandis que les pertes sont dévalorisées car elles renvoient à la notion de sanction. Ces deux alternatives, prévention et promotion, sont distinguées. Un message préventif a pour but de faire en sorte qu'un individu évite tel ou tel comportement, jugé nocif. Dans ce cas, le cadrage sera plutôt axé sur la perte. Tandis qu'un message de promotion a pour but de favoriser un comportement bénéfique. Il sera davantage axé sur le gain. Transposée à la qualité de l'air intérieur, une approche par la prévention inviterait à éviter des comportements et limiter des usages. Une approche par la promotion consisterait à développer des comportements et de nouveaux usages.

Les valeurs écologiques et les habitudes constituent des supports pour faire évoluer les comportements ([Marchand et al., 2018](#)). Au préalable, il convient de 1) créer une connaissance relative à la qualité de l'air intérieur et la valoriser. L'objectif de la construction de cette connaissance est que la population appréhende l'objet « air intérieur » de façon globale et prenne conscience des risques et des moyens d'en améliorer la qualité, notamment les facteurs comportementaux ; 2) développer une stratégie de communication et d'information reposant sur des messages visant à promouvoir une bonne qualité de l'air intérieur en agissant sur les usages dans les espaces intérieurs et les comportements de consommation.

L'utilisation croissante des appareils grand public de mesure de la qualité de l'air intérieur peut aider à la sensibilisation vis-à-vis de la pollution de l'air intérieur et à l'évolution des habitudes vers des comportements plus vertueux. Outre les limitations techniques de ces dispositifs, actuellement mis sur le marché sans contrôle, se pose la question de leur influence sur le long terme, une fois passé l'effet de nouveauté ([Allard, 2017](#)). La simple utilisation de tels capteurs ne semble pas suffisante et un accompagnement s'avère nécessaire pour fournir un socle de connaissances utiles à la bonne compréhension des données fournies pour que celles-ci ne soient pas anxiogènes, démobilisatrices ou simplement inutiles.

3.3. Rôle des politiques publiques

Les politiques publiques visant l'amélioration de la qualité de l'air intérieur s'appuient sur une série de programmes d'action et de mesures à différents niveaux de gouvernement, des collectivités locales aux services de l'État, jusqu'à l'échelon supranational. Ces politiques peuvent infléchir de façon déterminante les comportements individuels et collectifs en mobilisant divers instruments d'action publique, allant des mesures incitatives ou de communication sur le risque (informations, normes, labels, guides de bonnes pratiques) jusqu'à des règles contraignantes (interdiction de substances, seuils réglementaires).

En France, à titre d'illustration, l'élaboration d'une politique globale de l'air intérieur a fait l'objet d'un intérêt croissant de la part des autorités publiques à partir des années 1980 et a conduit à la mise en place de dispositifs de suivi et d'intervention pour prévenir ces pollutions spécifiques aux espaces clos (Le Bourhis, 2019). Si la lutte contre l'insalubrité des logements et leurs contaminations s'inscrit dans la tradition hygiéniste du 19^e siècle en Europe, une nouvelle volonté de gouverner les pollutions intérieures s'est affirmée durant les deux dernières décennies face à l'accroissement de l'exposition quotidienne à de multiples substances chimiques, des alertes sanitaires récurrentes (amiante, syndrome du bâtiment malsain, tabagisme passif) et un bâti de plus en plus confiné pour réduire la facture énergétique.

L'élaboration d'une politique de l'air intérieur coordonnée est cependant restée inachevée dans l'ensemble des pays industrialisés où fait encore défaut un cadre d'action unique en la matière. Elle prend par conséquent la forme d'une pluralité d'outils à disposition des acteurs publics qui couvrent une variété d'approches par lieu d'intervention, substance, source ou produit (Tableau 1).

Tableau 1. Principaux types d'actions publiques et exemples en matière d'air intérieur.

Approches	Instruments d'action publique			
	Contraignants	Incitatifs	Guidage par l'information et la connaissance	Organisation
Par lieu ou gestionnaire d'espaces (services et lieux publics, logements, bureaux)	Interdictions d'usages dans lieux publics (tabac) ; normes (ventilation, construction, bâtiments) ; surveillance obligatoire	Aides à la rénovation sous condition	Guides et brochures (pour habitants, bailleurs, gestionnaires) ; certificats (bâtiments) ; campagnes de mesures (capteurs)	Services d'intervention, inspections sanitaires, conseillers en environnement intérieur ; enquêtes statistiques
Par substance ou source de pollution	Seuils et valeurs réglementaires, valeurs limites d'exposition	-	Valeurs guides sanitaires ou de gestion	Plans et programmes d'action
Par produit	Normes par produits de consommation ; autorisation de mise sur le marché (matériaux, équipements, chauffage)	Politique d'achats publics orientée vers la réduction des sources polluantes	Étiquetage, labellisation (décoration, ameublement) ; formation des professionnels et artisans	Mise en place ou recommandation aux agences publiques techniques (bâtiment, matériaux)

Cette variété de dispositifs se double d'une multiplicité d'intervenants issus de secteurs d'intervention publique correspondant aux différentes facettes du problème. Dans le cas de la France, dix organismes ont une compétence en air intérieur au niveau national. Au niveau local, les municipalités interviennent en même temps que plusieurs services territoriaux de l'État dans les domaines de la santé publique, de l'environnement, mais aussi du logement, de l'urbanisme, de la construction et de la maîtrise de l'énergie.

Les inventaires des dispositifs mis en œuvre dans le monde (Baecher et al., 2017 ; OMS, 2021) montrent le recours prédominant à des actions incitatives ciblant la communication sur le danger des pollutions intérieures, la sensibilisation et la formation (occupants, gestionnaires, décideurs et professionnels), l'information sur les produits (étiquetage selon le niveau d'émissions en polluants) ou l'autosurveillance pour déclencher des actions correctrices (établissements recevant du public). Ces actions peuvent être complétées par un traitement des conséquences des contaminations, avec des services d'intervention (« ambulances vertes » en Belgique) ou de conseil en environnement intérieur (France) répondant à la demande d'habitants malades ou de médecins (voir encadré). Les guides, les recommandations et l'appui sur l'engagement volontaire sont majoritaires par rapport à des actions réglementaires plus rares, par seuils, interdiction d'usage ou de commercialisation, qui ne concernent par ailleurs qu'un nombre très limité de substances ou de produits émetteurs de polluants. La fixation des valeurs limites de référence n'est pas harmonisée au plan international, ou même européen, avec une standardisation inachevée des méthodes de mesure et d'échantillonnage et l'absence d'une liste unique de substances concernées, préalable indispensable pour un système de contrôle et de suivi réglementaire (Settimo et al., 2020).

Plusieurs facteurs ou obstacles expliquent cet inachèvement et les orientations prédominantes des politiques de l'air intérieur : réticence des acteurs politiques et des autorités à assumer les coûts liés à cette problématique émergente, mise en définitive sous la responsabilité des seuls occupants des locaux ; résistances à l'intervention de l'État des représentants d'intérêts industriels, de bailleurs ou de gestionnaires préférant reporter les investissements de mise en conformité (Shore, 2003) ; sanctuarisation de l'espace domestique en droit comme dans les représentations sociales. Ces obstacles peuvent entraîner une efficacité limitée des mesures engagées ou encourager l'inaction. Plusieurs pistes existent néanmoins pour améliorer la mise en œuvre concrète des actions d'amélioration de l'air intérieur. Alors que des groupes à faibles revenus apparaissent touchés de façon disproportionnée et soumis à une situation d'inégalité systémique en matière d'air intérieur (Ferguson et al., 2021), les acteurs publics peuvent adapter leur réponse à la spécificité des problèmes (prédominance des contaminations fongiques liées à l'humidité des locaux, par exemple) et compenser par des méthodes adéquates leurs capacités réduites à appliquer des mesures correctives. Face à la multitude des polluants intérieurs et à la complexité de leur mesure, source potentielle d'inaction, le recours à des indicateurs globaux et simplifiés de qualité de l'environnement intérieur (mesure du CO₂ ou de l'humidité par capteurs) peut permettre de mieux guider l'action, à l'image des solutions éprouvées pendant la pandémie de COVID-19 (Edwards et al., 2021). L'attention portée à l'aération dans la lutte contre un virus aéroporté constitue également une opportunité unique pour porter des politiques de l'air intérieur plus ambitieuses.

Encadré

Le métier de conseiller en environnement intérieur

Comprendre certaines maladies, notamment respiratoires et allergiques, peut être facilité par l'observation de l'environnement domestique du malade. Ainsi, dans plusieurs pays, le métier de conseiller en environnement intérieur s'est développé, avec pour objectif de compléter le diagnostic du médecin, par une inspection du logement et parfois des mesures, puis d'aider à la formulation de conseils personnalisés pour réduire les effets sur la santé (Le Cann et al., 2017).

4. Perspectives

Les connaissances sur les polluants présents dans l'environnement intérieur et leurs effets sur la santé ont significativement progressé ces dernières années et les principaux leviers d'actions pour réduire les expositions à ces polluants sont identifiés. Des recherches restent nécessaires pour répondre aux nouvelles interrogations qui se font jour, en lien avec de nouveaux usages ou nouveaux matériaux et produits, la rénovation énergétique ou encore le changement climatique. L'efficacité de certaines solutions techniques ou comportementales reste également à évaluer. De plus, en parallèle du développement des connaissances, la sensibilisation et la mobilisation de tous les acteurs, occupants, décideurs, constructeurs et gestionnaires de bâtiments, sont fondamentales pour une prise de conscience collective des enjeux de santé associés et pour garantir des bâtiments sains et durables.

4.1. Un sujet au cœur des problématiques environnementales et sociétales

Le bâtiment est un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre et l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est aujourd'hui une nécessité impérieuse. La construction ou la rénovation de logements performants énergétiquement ne doit cependant pas se faire au détriment de la qualité de l'air intérieur. En effet, le renforcement de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment par l'isolation intérieure ou extérieure ou le changement des fenêtres, peut conduire à réduire le renouvellement de l'air, donc possiblement dégrader la qualité de l'air intérieur si par ailleurs aucune attention n'est portée à la ventilation (Ortiz et al., 2020). Au contraire, la rénovation énergétique, qui s'annonce massive, doit être envisagée comme une formidable opportunité d'améliorer la qualité sanitaire des bâtiments pour peu que cette dimension ne soit pas ignorée.

Dans le futur, des températures intérieures plus élevées favoriseront les émissions en polluants volatils des matériaux et produits de construction et de décoration, et ainsi les expositions à ces polluants (Vardoulakis et al., 2015). Par ailleurs, l'augmentation des concentrations atmosphériques extérieures en ozone impactera la qualité de l'air intérieur du fait des phénomènes de réactivité chimique abordés précédemment. De plus, dans le contexte d'événements climatiques extrêmes que l'on anticipe plus fréquents, la population pourra être exposée à des moisissures suite à des inondations ou bien au monoxyde de carbone lors de l'utilisation d'appareils de chauffage d'appoint non raccordés ou inadaptés (groupes électrogènes) pour pallier les possibles coupures d'électricité, comme cela a déjà été observé. Via une dégradation de la qualité de l'air intérieur, le changement climatique induira des effets néfastes supplémentaires sur la santé humaine.

4.2. Des perspectives de recherche encore nombreuses

De nombreuses recherches restent à mener pour améliorer la connaissance des pollutions intérieures et leurs effets sur la santé humaine. Une question récurrente est celle de la présence de substances dites « émergentes », à savoir que l'on peut désormais mesurer grâce à des méthodes d'analyse plus sensibles ou non ciblées, ou bien nouvellement introduites dans les bâtiments via de nouveaux usages ou produits, comme le vapotage, l'impression 3D ou les nanomatériaux, ou encore qui posent question du fait de leurs possibles effets sur la santé, comme les perturbateurs endocriniens (Salthammer, 2020). Les nanoparticules peuvent être incorporées aux matériaux de construction et aux produits de consommation pour leur conférer des propriétés spécifiques, de résistance ou antibactériennes par exemple. Leur possible émission dans l'air au cours de l'utilisation, puis de la dégradation de ces matériaux et produits, interroge tandis que les publications scientifiques font émerger le caractère préoccupant des particules de taille nanométrique pour la santé.

Le développement croissant de capteurs de mesure en continu de certains paramètres de l'air intérieur ouvre la voie à des mesures plus facilement réalisables et plus massives. Même si, pour la majorité de ces capteurs, le spectre des polluants mesurés est très restreint et leur fiabilité et leur durabilité encore inconnues, leur utilisation est prometteuse à la fois pour la gestion des bâtiments et la sensibilisation de tous comme évoqué précédemment, mais également pour la recherche.

Enfin, s'agissant de sensibilisation, information et éducation, de multiples guides ont été publiés ces dernières années dans de nombreux pays. Pour autant, ils semblent avoir eu une portée limitée. Des résultats récents en psychologie expliquent la complexité à faire évoluer certains comportements, comme l'aération, et l'importance de davantage explorer les motivations individuelles qui leur sont liées (Durand et al., 2022). Ainsi, les recherches en sciences humaines doivent explorer des modes nouveaux de communication pour toucher toute la population, et en particulier les personnes les plus vulnérables ou concernées.

Même si des travaux de recherche sont encore nécessaires, il est nécessaire d'agir sans attendre. Les freins, techniques, politiques, économiques, sociétaux et culturels, sont bien présents mais doivent être surmontés pour des bâtiments favorables à la santé de tous.

Notions clés

1. La qualité de l'air intérieur est une thématique complexe qui recouvre une grande diversité de polluants émis par de nombreuses sources
2. Les effets sur la santé de la pollution intérieure sont très divers et documentés
3. Des solutions existent pour améliorer la qualité de l'environnement intérieur et nécessitent l'implication des pouvoirs publics, des occupants des locaux et des acteurs économiques
4. Des travaux de recherche restent nécessaires pour documenter la présence et les effets sanitaires éventuels de nouvelles pollutions intérieures dans un monde changeant
5. La connaissance individuelle de l'enjeu de santé que représente la qualité sanitaire des bâtiments est à développer au sein d'une culture globale autour de la notion « Une seule planète, une seule santé »

Présentations des auteurs du chapitre

Corinne Mandin est ingénieure chimiste et docteure en sciences. Elle coordonne l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Marne-La-Vallée, France.

Philippe Glorennec est enseignant en évaluation des risques sanitaires à l'École des Hautes Études en Santé Publique, chercheur à l'Institut de recherche en santé, environnement et travail (Irset), UMR Inserm 1085, Rennes, France.

Marion Keirsbulck est responsable de l'unité en charge de l'évaluation des risques sanitaires liés à l'air à l'Agence nationale de sécurité sanitaire dans le domaine de l'alimentation, l'environnement et le travail (Anses), Maisons-Alfort, France.

Jean-Pierre Le Bourhis est chargé de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialiste des questions de politiques environnementales et de santé environnementale,

directeur du laboratoire Arènes, Rennes, France.
Nonvignon Marius Kêdoté est enseignant chercheur au département de santé environnement à l'Institut Régional de Santé Publique, Comlan Alfred Quenum (IRSP-CAQ) et chercheur à la Communauté de pratique Ecosystème et santé pour l'Afrique de l'Ouest et du Centre (COPES-AOC), Bénin.
Dorothee Marchand est docteure et chercheuse en psychologie sociale et environnementale au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Marne-La-Vallée, France.
Véronique Yoboué est enseignante et directrice du Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'Énergie Solaire (LASMES) de l'Université Félix-Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Références bibliographiques

1. Abera A., Friberg J., Isaxon C., et al. (2021), Air Quality in Africa: Public Health Implications, *Annual Review of Public Health*, vol. 42, p. 193-210. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-100119-113802>
2. Allard L. (2017), Etude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air, ADEME.
3. Annesi-Maesano I., Baiz N., Banerjee S., et al. (2013), Indoor air quality and sources in schools and related health effects, *Journal of toxicology and environmental health. Part B, Critical reviews*, vol. 16, n° 8, p. 491-550. <https://doi.org/10.1080>
4. Anses (2016), Moisissures dans le bâti : avis et rapport de l'Anses, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
5. Baecher C., Pianu B., Ungerer A., et al. (2017), Benchmark international des politiques publiques de la qualité de l'air, ADEME.
6. Brink H.W., Loomans M., Mobach M.P., et al. (2021), Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review, *Indoor Air*, vol. 31, n° 2, p. 405-425. <https://doi.org/10.1111/ina.12745>
7. Boulanger G., Bayeux T., Mandin, C., et al. (2017), Socio-economic costs of indoor air pollution: A tentative estimation for some pollutants of health interest in France, *Environment international*, vol. 104, p. 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.03.025>
8. Cacho C., Ventura G., Martins A., et al. (2013), Air pollutants in office environments and emissions from electronic equipment: a review, *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 22, n° 9, p. 2488-2497.
9. Durand F., Bonnefoy B., Marchand D., et al. (2022), Psychological antecedents of the intention to open the windows at home and exposure to a ventilation recommendation, *Front. Psychol.*, vol. 13, 872626. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.872626>
10. EC (1989) European Concerted Action Indoor Air Quality and Its Impact on Man: COST Project 613: Report No.1: Radon in Indoor Air. European Commission. Accessible via : <https://op.europa.eu/en/publication-detail>

11. Edwards N., Colder B., Sullivan J., et al. (2021), A Practical Approach to Indoor Air Quality for Municipal Public Health and Safety, *Open Journal of Political Science*, vol. 11, p. 176-191. <https://doi.org/10.4236/ojps.2021.111012>
12. Etchevers A., Le Tertre A., Lucas J-P., et al. (2015), Environmental determinants of different blood lead levels in children: a quantile analysis from a nationwide survey, *Environment international*, vol. 74, p. 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.007>
13. Ferguson L., Taylor J., Zhou K., et al. (2021), Systemic inequalities in indoor air pollution exposure in London, UK, *Buildings and Cities*, vol. 2, n° 1, p. 425-448. <http://doi.org/10.5334/bc.100>
14. Fisk W.J. (2017), The ventilation problem in schools: literature review, *Indoor Air*, vol. 27, n° 6, p. 1039-1051. <https://doi.org/10.1111/ina.12403>
15. GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020), Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, *Lancet*, vol. 396, n° 10258, p. 1223-1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
16. Glorennec P., Lucas J-P., Mercat A-C., et al. (2016), Environmental and dietary exposure of young children to inorganic trace elements, *Environment International*, vol. 97, p. 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.009>
17. Glorennec P., Shendell D.G., Rasmussen P.E., et al. (2021), Toward setting public health guidelines for chemicals in indoor settled dust? *Indoor Air*, vol. 31, n° 1, p. 112-115. <https://doi.org/10.1111/ina.12722>
18. Hänninen O., Knol A.B., Jantunen M., et al. (2014), Environmental burden of disease in Europe: assessing nine risk factors in six countries, *Environmental Health Perspectives*, vol. 122, n° 5, p. 439-446. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206154>
19. Ibanez Y., Le Bot B., Glorennec P. (2010), House dust metal content and bioaccessibility: a review, *European Journal of Mineralogy*, vol. 22, p. 629-637. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-2010>
20. Kafando B., Windinpsidi Savadogo P., Millogo T., et al. (2018), Pollution de l'air intérieur et prévalence des infections respiratoires aiguës chez les enfants à Ouagadougou, *Santé Publique*, vol. 30, p. 575-586. <https://doi.org/10.3917/spub.185.0575>
21. Kahneman D., Tversky A. (1979), Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, vol. 47, n° 2, p. 263-291. <https://doi.org/10.2307/1914185>
22. Keita S., Liousse C., Yoboué V., et al. (2018), Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa, *Atmospheric Chem. Phys.*, vol. 18, n° 10, p. 7691-7708. <https://doi.org/10.5194/acp-18-7691-2018>
23. Kouao A.K.R., N'datchoh E.T., Yoboué V., et al. (2019), Exposure to indoor and outdoor air pollution among children under five years old in urban area, *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* Vol. 5, n° 2, p. 191-202. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.02.05>
24. Lanphear B.P., Matte T.D., Rogers J., et al. (1998), The contribution of lead-contaminated house dust and residential soil to children's blood lead levels. A pooled analysis of 12 epidemiologic studies, *Environmental Research*, vol. 79, n° 1, p. 51-68. <https://doi.org/10.1006/enrs.1998.3859>
25. Larsson K., Berglund M. (2018), Children's exposure to chemicals in indoor environments - a literature survey of chemicals in dust, Rapport téléchargeable via : <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1220692/FULLTEXT01.pdf>
26. Le Bourhis J-P. (2019), Du privé au public et retour : les politiques de l'air intérieur entre régulation et responsabilisation, *Environnement Risque Sante*, vol. 18, p. 318-322. DOI: 10.1684/ers.2019.1331

27. Le Cann P., Paulus H., Glorennec P., et al. (2017), Home Environmental Interventions for the Prevention or Control of Allergic and Respiratory Diseases: What Really Works, *Journal of Allergy and Clinical Immunology. In Practice*, vol. 5, n° 1, p. 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.jaip.2016.07.011>
28. Levallois P., St-Laurent J., Gauvin D., et al. (2014), The impact of drinking water, indoor dust and paint on blood lead levels of children aged 1-5 years in Montréal (Québec, Canada), *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 24, n° 2, p. 185-191. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.129>
29. Licina D., Morrison G.C., Bekö G., et al. (2019), Clothing-Mediated Exposures to Chemicals and Particles, *Environmental Science and Technology*, vol. 53, n° 10, p. 5559-5575. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00272>
30. Marchand D., Bonnefoy B., Durand F., et al. (2018), Etude des représentations sociales de la qualité de l'air intérieur et évolution des comportements. ADEME/CSTB.
31. Mir Alvarez C., Hourcade R., Lefebvre B., et al. (2020), A Scoping Review on Air Quality Monitoring, Policy and Health in West African Cities, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, n° 23, 9151. <https://doi.org/10.3390/ijerph17239151>
32. Morawska L., Afshari A., Bae G.N., et al. (2013), Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment, *Indoor Air*, vol. 23, n° 6, p. 462-487. <https://doi.org/10.1111/ina.12044>
33. Morawska L., Allen J., Bahnfleth W., et al. (2021), A paradigm shift to combat indoor respiratory infection, *Science*, vol. 372, n° 6543, p. 689-691. <https://doi.org/10.1126/science.abg2025>
34. NAS (2016), Health Risks of Indoor Exposure to Particulate Matter: Workshop Summary, Board on Population Health and Public Health Practice, Health and Medicine Division, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, National Academies Press (US).
35. NAS (2017), Microbiomes of the Built Environment: A Research Agenda for Indoor Microbiology, Human Health, and Buildings, Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23647>
36. Ndong Ba A., Verdin A., Cazier F., et al. (2019), Individual exposure level following indoor and outdoor air pollution exposure in Dakar (Sénégal), *Environmental Pollution*, vol. 248, p. 397-407. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.042>
37. OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (1983), Indoor Air Pollutants: exposure and health effects, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
38. OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2009), WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
39. OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2010), WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
40. OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2016), Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children, Geneva: WHO.
41. OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2021), Policies, regulations and legislation promoting healthy housing: a review, Geneva: WHO.
42. Ortiz M.A., Itard L., Bluyssen P.M. (2020), Indoor environmental quality related risk factors with energy-efficient retrofitting of housing: A literature review, *Energy and Buildings*, vol. 221, 110102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110102>

43. Pelletier M., Bonvallet N., Ramalho O., et al. (2017), Indoor residential exposure to semivolatile organic compounds in France, *Environment International*, vol. 109, p. 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.024>
44. Rasmussen P.E., Levesque C., Chénier M., et al. (2013), Canadian House Dust Study: population-based concentrations, loads and loading rates of arsenic, cadmium, chromium, copper, nickel, lead, and zinc inside urban homes, *Science of the Total Environment*, vol. 443, p. 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.003>
45. Rudel R.A., Perovich L.J. (2009), Endocrine disrupting chemicals in indoor and outdoor air, *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 1, p. 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.025>
46. Salthammer T. (2020), Emerging indoor pollutants, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 224, 113423. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113423>
47. Settimo G., Manigrasso M., Avino P. (2020), Indoor Air Quality: A Focus on the European Legislation and State-of-the-Art Research in Italy, *Atmosphere*, vol. 11, n° 4, 370. <https://doi.org/10.3390/atmos11040370>
48. Shore A. (2003), *Indoor Air Pollution: Environmental Inequality Inside, Dans Synthetic Planet Chemical Politics and the Hazards of Modern Life*, Routledge, New-York.
49. Vardoulakis S., Dimitroulopoulou C., Thornes J., et al. (2015), Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK, *Environment international*, vol. 85, p. 299-313. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.010>
50. Vardoulakis S., Giagloglou E., Steinle S., et al. (2020), Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, n° 23, 8972. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>
51. Viegi G., Simoni M., Scognamiglio A., et al. (2004), Indoor air pollution and airway disease. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, vol. 8, n° 12, p. 1401-1415.
52. Wargocki P., Wyon D.P. (2017), Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork, *Building and Environment*, vol. 112, p. 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.020>
53. Wei W., Ramalho O., Mandin C. (2015), Indoor air quality requirements in green building certifications. *Building and Environment*, vol. 92, p. 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.035>
54. Wei W., Boumier J., Wyart G., et al. (2016), Cleaning practices and cleaning products in nurseries and schools: To what extent can they impact indoor air quality? *Indoor Air*, vol. 26, p. 517-525. <https://doi.org/10.1111/ina.12236>
55. Weschler C.J., Nazaroff W.W. (2008), Semivolatile organic compounds in indoor environments, *Atmospheric Environment*, vol. 42, n° 40, p. 9018-9040. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.052>
56. Weschler C.J., Nazaroff W.W. (2014), Dermal uptake of organic vapors commonly found in indoor air, *Environmental Science and Technology*, vol. 48, n° 2, p. 1230-1237. <https://doi.org/10.1021/es405490a>
57. Weschler C.J., Carslaw N. (2018), Indoor Chemistry, *Environmental Science and Technology*, vol. 52, n° 5, p. 2419-2428. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06387>
58. Wolkoff P. (2013), Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 216, n° 4, p. 371-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.08.001>

Liste des termes à indexer

Aération ; Agent biologique ; Agent physique ; Aldéhyde ; Bâtiment ; Biomasse ; Capteur ; COV ; Comportement ; Cutané ; Épuration ; Exposition ; Ingestion ; Inhalation ; Moisissure ; OMS ; Particule ; Pathologie respiratoire ; Performance énergétique ; Perturbateur endocrinien ; Poids des maladies ; Politique publique ; Poussière sédimentée ; Risque ; SBS ; Sensibilisation ; Substance chimique ; Source ; Valeur guide ; Ventilation

Liste des sigles utilisés

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CO₂ : dioxyde de carbone

COSV : Composé Organique Semi-Volatil

COV : Composé Organique Volatil

COVID-19 : maladie à coronavirus 2019

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

ISIAQ : *International Society for Indoor Air Quality and Climate*

ISO : *International Organization for Standardization*

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PCB : polychlorobiphényles

PM₁₀ : particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm

PM_{2,5} : particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 µm

VGAI : Valeur Guide de qualité de l'Air Intérieur