



T

H

É

M

A

Essentiel

Commissariat général au développement durable

Qualité de l'air intérieur : nouveaux enjeux

OCTOBRE 2017

Nouveaux bâtiments, nouveaux matériaux, expositions multiples, agents biologiques : autant d'enjeux émergents de la qualité de l'air intérieur qui ont fait l'objet d'un colloque de restitution de projets de recherche du programme Primequal en octobre 2016 à Marseille.



© Xavier Arnauld/Stock

Primequal, programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air, est un programme de recherche mis en œuvre par le Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) et par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Il vise à fournir les bases scientifiques et les outils nécessaires aux décideurs et aux gestionnaires de l'environnement pour surveiller et améliorer la qualité de l'air intérieur et extérieur afin de réduire les risques pour l'environnement et la santé.

Le programme Primequal a lancé fin 2011 un appel à propositions de recherche sur les « environnements intérieurs et approches innovantes ». Les projets de recherche sélectionnés ont abordé de nombreux enjeux émergents de la qualité de l'air intérieur. **Ce THÈMA en présente les principales conclusions, à destination des décideurs et des gestionnaires.**

UNE PRÉOCCUPATION MAJEURE DE SANTÉ PUBLIQUE

La qualité de l'air intérieur est un axe important de progrès en santé environnement en France et dans de nombreux pays. Ainsi, une bonne qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment induit par exemple un effet positif démontré sur le bien-être des occupants, l'apprentissage des enfants, et la diminution de l'absentéisme. À l'inverse, la présence de plusieurs substances nocives dans les espaces intérieurs, conjuguée à l'importante durée d'exposition des occupants, peut favoriser l'émergence d'effets sanitaires qui font de la qualité de l'air intérieur une véritable préoccupation de santé publique.

Dans l'Union européenne, deux millions d'années de vie en bonne santé sont ainsi perdues chaque année du fait de l'exposition à la pollution dans les bâtiments. En 2014, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) et l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) ont estimé **le coût induit par une mauvaise qualité de l'air intérieur en France à près de 20 milliards d'euros par an**, seulement pour quelques substances.

Les questionnements scientifiques restent nombreux, malgré une sensible amélioration des connaissances et de la démarche globale de prévention sanitaire (comme par exemple la surveillance des lieux accueillant des enfants) engagée par les pouvoirs publics au travers des Plans nationaux santé environnement ; plans dont le troisième, le PNSE3 lancé en 2015, inclut un plan d'actions spécifiques sur la qualité de l'air intérieur. De nouveaux risques, dits émergents, apparaissent, sources d'incertitudes, voire de controverses, liées aux difficultés à démontrer et à caractériser des effets sur la santé, ou à l'insuffisance de dispositifs susceptibles de repérer et mesurer d'éventuels risques pour la santé. Les problématiques posées par ces risques émergents, et notamment ceux liés aux perturbateurs endocriniens, aux nanomatériaux, aux particularités des effets cocktails et des très faibles doses, partagent des similitudes fortes en ce que la mesure de ces risques est encore incertaine. **La qualité de l'air intérieur a donc plus que jamais besoin de travaux de recherche et développement.**

NOUVEAUX BÂTIMENTS ET NOUVEAUX ENJEUX

Le monde du bâtiment fait sa révolution autour de plusieurs grands sujets. En premier lieu, la priorité donnée à la rénovation thermique des bâtiments met l'accent sur l'étanchéité de l'enveloppe et sur un renouvellement de l'air contrôlé et efficace. L'aération et les systèmes de ventilation jouent ainsi un rôle primordial afin que la qualité de l'air intérieur ne soit pas oubliée dans les bâtiments économes en énergie. Ensuite, l'accélération du déploiement des outils numériques à l'échelle de tout le secteur du bâtiment et la digitalisation des espaces avec l'arrivée de capteurs et objets connectés permettent l'exploitation de grands volumes de données (big data) pour mieux comprendre, simuler, concevoir et gérer les espaces intérieurs. Enfin, de nouveaux matériaux, dits « intelligents » ou « actifs » et dont les performances innovantes sont dopées, par exemple, par les nanotechnologies, s'invitent dans nos intérieurs : résistance mécanique, durabilité, isolation thermique, auto-nettoyabilité, épuration, auto-modification des couleurs, détection par incorporation de nano-capteurs, auto-réparabilité... Certaines de ces innovations sont questionnées quant à leur impact sur la qualité de l'air intérieur.

Matériaux photocatalytiques : des performances encore limitées

Le marché des matériaux de construction nano-additivés croît aujourd'hui de façon exponentielle. L'application la plus commune a pour objectif de leur conférer des propriétés photocatalytiques pour l'auto-nettoyage et l'épuration de l'air, en recourant par exemple au dioxyde de titane (TiO₂) notamment du fait de son faible coût et de sa facilité de mise en œuvre.

Cependant, l'usage des matériaux nano-additivés soulève de nombreuses interrogations relatives à l'évaluation des risques pour la population et l'environnement :

- leur faculté à émettre des particules ultrafines durant leur usage et en fin de vie ;
- la production de sous-produits réactionnels comme le formaldéhyde, l'acétone, le propanal... ;
- leur comportement dans le temps (dégradation, usure).

Les recherches sur 12 matériaux [Nicolas *et al.*, 2016] ont pu démontrer que :

- d'une manière générale, l'efficacité d'épuration des matériaux nano-additivés testés est relativement faible ;
- le vieillissement de ces produits affecte, pour certains, leur performance en tant qu'épurateur d'air ;
- des substances issues de sous-produits réactionnels peuvent être émises, avec un possible risque sanitaire ;
- l'abrasion des surfaces nano-additivées produit quelques particules nanométriques, sans qu'aucune conclusion sanitaire ne puisse en être tirée à ce stade.

La modélisation numérique des espaces intérieurs au cœur des études

La progression concomitante des puissances de calculs, de la disponibilité de données (big data, open data), et des

capteurs communicants offre à la modélisation numérique une place de plus en plus importante dans la recherche. Pour la qualité de l'air intérieur, la modélisation vise par exemple à comprendre la dynamique d'évolution de la présence d'un ou plusieurs polluants, à mesurer l'impact de la présence des occupants et de leurs activités sur la qualité de l'air, à hiérarchiser l'importance relative de différents phénomènes physico-chimiques, ou encore à évaluer la dispersion d'un aérosol dans un environnement complexe... Plusieurs approches se complètent et ouvrent de nouveaux horizons pour une gestion intégrée des bâtiments. La modélisation peut s'appuyer sur une compréhension fine des phénomènes physico-chimiques [Schoemaeker *et al.*, 2016], permettant de simuler le comportement global d'un espace. Une autre approche, plus orientée vers la prévision, consiste à analyser des historiques de mesure en grande quantité à l'aide d'une palette d'outils statistiques [Ramalho *et al.*, 2016].

DE BONNES PRATIQUES SUGGÉRÉES PAR LES PROJETS DE RECHERCHE – Partie 1

Les **mesures de concentration en CO₂**, même si elles ne peuvent pas rendre compte à elles seules de la qualité de l'air, permettent d'identifier des situations inadaptées de ventilation, particulièrement critiques dans les bâtiments à isolation renforcée. La mise à disposition d'analyseurs-enregistreurs de CO₂, dont le coût est abordable et l'utilisation aisée, permettrait à la fois une sensibilisation à la problématique de la qualité de l'air, l'identification de dysfonctionnements récurrents ou accidentels, et une amélioration par un réglage fin des installations.

Les polluants peuvent par ailleurs subir des transformations chimiques, notamment sous l'effet de la lumière (photolyse), produisant ainsi des composés potentiellement toxiques. En particulier lors d'opérations de nettoyage, la présence d'oxydants provenant de l'extérieur comme l'ozone, ou formés par photolyse *in situ*, conduit à la production de formaldéhyde et de particules fines... L'exposition aiguë des occupants, en particulier le personnel d'entretien, aux polluants ainsi formés peut s'avérer préoccupante. **La modification de la nature des vitrages ou l'installation de films filtrant les longueurs d'ondes de la lumière** susceptibles d'activer ces phénomènes sont des recommandations possibles.

Certains composés ne sont pas préoccupants en tant que tels mais plutôt via les réactions chimiques auxquelles ils contribuent et qui génèrent des polluants secondaires potentiellement impactant. Les terpènes font partie de cette catégorie, ce qui pourrait justifier qu'ils soient ajoutés dans la liste actuelle des composés pris en compte pour l'étiquetage des matériaux d'ameublement et de construction.

Le déploiement de la collecte de données en grand nombre, ainsi que leur utilisation, met en avant de nouveaux enjeux liés notamment à la disponibilité et la qualité des données et mesures : validation, gestion, propriété, protection des libertés, coûts.

AGENTS BIOLOGIQUES DE L'AIR INTÉRIEUR

Nous passons près de 80 % de notre temps à l'intérieur des bâtiments. Or, parmi les multiples polluants présents, de nombreux agents microbiologiques sont véhiculés par l'air, constituant des bio-aérosols (aérosols provenant d'un organisme vivant, animal ou végétal) dont certains peuvent induire des maladies chez les occupants : allergies, infections, toxi-infections... L'exposition des occupants à ces composés potentiellement toxiques est ainsi un sujet de santé publique. Les moisissures, par exemple, sont ainsi présentes dans un tiers des logements français selon l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI).

On trouve toutes sortes de bio-aérosols dans l'air intérieur, en concentrations et proportions variables selon la typologie des lieux, l'environnement extérieur, et les activités pratiquées par les occupants. Ainsi la composition de l'air d'un hôpital diffère de celle d'une maison, d'une salle de classe ou d'un bureau, et varie aussi selon les saisons ou les équipements techniques du bâtiment...

Des virus et des bactéries dans les bio-aérosols

Les recherches menées [Garon *et al.*, 2016] ont ainsi pu mettre en évidence qu'en milieu hospitalier, l'air contient des bio-aérosols d'origine humaine (gouttelettes contenant des virus par exemple) ou environnementale comme des bactéries. Dans un établissement d'enseignement, une salle de classe en hiver présente également de nombreuses « opportunités » de transmission de virus comme la grippe [Ha *et al.*, 2016], directement via l'air (éternuement, parole...) ou par contact avec des surfaces contaminées (poignées de portes, bureaux...).

Ces caractérisations sont importantes : en effet, 80 % des infections virales aiguës contractées dans les espaces clos touchent la sphère respiratoire. Elles sont fréquentes, transmises dans la plupart des cas par voie interhumaine directe, et présentent des degrés de gravité divers, depuis des troubles bénins jusqu'à des affections mortelles. La grippe par exemple affecte chaque année environ 2,5 millions de personnes et peut entraîner des complications graves chez les sujets à risque : plus de 90 % des décès liés à la grippe surviennent chez les personnes de 65 ans et plus.

Les bio-aérosols fongiques

Parmi les polluants microbiologiques généralement présents dans les espaces clos figurent les micro-mycètes, champignons microscopiques, capables de proliférer sur la plupart des matériaux de construction et de décoration dès lors qu'ils disposent de conditions environnementales adaptées. Ainsi, la campagne nationale menée en France par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur a montré que plus de 610 000 logements présentaient des surfaces de plus de 1 m² contaminées par des moisissures. La généralisation des équipements ménagers générateurs de vapeur (centrale vapeur, nettoyeur vapeur...), et une ventilation parfois incompatible avec le taux d'occupation

et l'activité des occupants, conduisent à une augmentation de l'humidité, propice à la prolifération des champignons microscopiques et, en corollaire, à la production de leurs métabolites tels les mycotoxines [Draghi *et al.*, 2015].

Les bio-aérosols fongiques provoquent surtout des allergies et des maladies respiratoires, comme l'asthme, et parfois des infections pulmonaires graves (aspergillose)... Quant aux micro-mycètes, certains produisent des mycotoxines dont les effets sanitaires sont de nature variable : des effets hépatotoxiques, neurotoxiques, mutagènes, tératogènes et cancérigènes ont été mis en évidence chez l'animal par voie digestive et même respiratoire. Les mycotoxines pourraient être associées à l'exacerbation de l'asthme et à des infections fongiques chez les personnes immunodéprimées. De plus, les mycotoxines pourraient occasionner des effets systémiques plus généraux comme un effet sur la tension artérielle et le rythme cardiaque.

Si les conséquences liées à l'ingestion de ces substances sont bien connues, ce qui a notamment permis l'établissement de normes alimentaires, leur toxicité après inhalation ou simple contact doit encore être étudiée.

DE BONNES PRATIQUES SUGGÉRÉES PAR LES PROJETS DE RECHERCHE – Partie 2

L'importance de l'humidité relative a été mise en évidence, mais avec un impact différencié selon l'agent biologique visé : une réduction de l'hygrométrie réduit les risques de contamination fongique, alors qu'une augmentation de l'hygrométrie est délétère pour les virus. Un suivi hebdomadaire de l'humidité relative est conseillé dans les environnements spécifiques (écoles, hôpitaux...) surtout pendant les pics de contamination (été et automne pour les bio-aérosols fongiques).

Tous les matériaux de construction n'ont pas la même vulnérabilité au regard des contaminations biologiques. Les entreprises de travaux et les exploitants de bâtiments pourraient **choisir des matériaux de construction adaptés aux différents lieux de vie pour limiter la transmission par les surfaces contaminées** : le cuivre et le linoléum par exemple semblent présenter des propriétés virucides. En cas de contamination, des précautions sont à prendre, en particulier pour les professionnels, lors de la réhabilitation des locaux pour limiter les risques associés à la manipulation des supports contaminés. Des pics de contamination fongique, non saisonniers, ont aussi été mis en évidence lors de différents travaux : excavation, terrassement, sciage, câblage, finitions... Dans le cas de travaux dans des espaces sensibles, comme les hôpitaux, il convient alors de limiter l'émission et la dissémination des bio-aérosols dans les zones où les patients circulent. Le recours à des sas équipés de revêtement adhésif au sol permet de maintenir un faible niveau d'exposition.

Des projets de recherche fortement axés sur la mesure

Pour caractériser les expositions aux agents biologiques, il est possible de suivre des espaces de vie occupés, mais il est également envisageable de reproduire des conditions réelles afin de simuler diverses configurations. Cette capacité de simulation s'avère indispensable sur le long terme par exemple pour tester des solutions de prévention. Des mannequins thermiques (cf. figure 1) ont par exemple été conçus et réalisés avec succès afin de prendre en compte l'émission de chaleur par des corps humains, qui peut agir sur l'aérodynamique de la pièce [Ha *et al.*, 2016]. Un simulateur d'émissions oropharyngées, génère des gouttes inhalables dans les conditions proches de celles émises lors de la respiration (1 m/s), la parole (5 m/s) et la toux (10 m/s). Des collecteurs installés dans une pièce mesurent alors le niveau d'exposition au virus en différents endroits.



Figure 1. Exposition simulée aux virus en présence de mannequins thermiques (source : Ha *et al.*, 2016).

Également utilisables dans un cadre préventif, un dispositif individuel adapté à la collecte des particules toxiques ainsi qu'un dosage des micro-mycètes par une méthode analytique multi-détection originale ont été développés [Draghi *et al.*, 2015]. Ils pourraient passer au stade opérationnel après des travaux complémentaires.

DES RÉSULTATS ET DES INTERROGATIONS

L'appel à propositions de recherche Primequal a donc permis d'apporter des conclusions opérationnelles. Il reste

néanmoins de nombreux questionnements scientifiques :

- sur les modalités de construction (prévention des transferts de l'air extérieur vers l'air intérieur, émissions et réactivité de nouveaux matériaux de surface...),
- sur le rôle de l'usager, de ses comportements (aération, chauffage, climatisation...) et de ses activités (cuisson, tabagisme, ménage, bricolage...),
- sur les besoins en métrologie des polluants spécifiques à l'air intérieur, via des dispositifs ponctuels ou continus, intégrant éventuellement des micro-capteurs individuels.

RÉFÉRENCES DES PROJETS DE RECHERCHE SOUTENUS DANS LE CADRE DE PRIMEQUAL

- Bonvallot *et al.*, 2016. Expositions cumulées aux composés organiques semi-volatils dans l'habitat et risques pour le développement de l'enfant : construction de valeurs toxicologiques de référence pour des expositions multiples. Rapport PRIMEQUAL, 149 pages. -
- Draghi *et al.*, 2015. Moisissures dans les environnements intérieurs : problématique des mycotoxines respiratoires. Rapport PRIMEQUAL, 91 pages.
- Garon *et al.*, 2016. Suivi de la qualité de l'air dans un établissement de soins : caractérisation microbiologique et toxicité des bio-aérosols. Rapport PRIMEQUAL, 154 pages.
- Ha *et al.*, 2016. Étude des déterminants environnementaux de l'exposition virale : application à la surveillance et gestion des viroses respiratoires dans une salle de classe. Rapport PRIMEQUAL, 156 pages.
- Le Bourhis *et al.*, 2016. Air intérieur : actions publiques et jeux d'acteurs. Rapport PRIMEQUAL, 280 pages. -
- Nicolas *et al.*, 2016. Impact des matériaux photocatalytiques sur la qualité de l'air des environnements intérieurs. Rapport PRIMEQUAL, 106 pages.
- Ramalho *et al.*, 2016. Suivi dynamique en temps réel de la qualité de l'air intérieur dans un environnement de bureaux : contributions des sources et modèle prévisionnel. Rapport PRIMEQUAL, 151 pages.
- Schoemaeker *et al.*, 2016. Caractérisation détaillée de l'air intérieur des bâtiments énergétiquement performants par couplage entre mesures expérimentales représentatives et modélisation de l'air intérieur. Rapport PRIMEQUAL, 177 pages.

POUR EN SAVOIR PLUS

Colloque Primequal « Qualité de l'air intérieur : nouveaux bâtiments et matériaux, expositions multiples, agents biologiques » (Marseille, 18 et 19 octobre 2016)

Directrice de la publication : Laurence Monnoyer-Smith, Commissaire générale au développement durable
Auteurs : Guillaume Gay (CGDD), Nathalie Poisson (ADEME), Camille Février (DGPR)
Dépôt légal : octobre 2017
ISSN : 2555-7564

Commissariat général au développement durable

Direction de la recherche et de l'innovation
Service de la recherche
Mission risques et environnement – santé
Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Courriel : Sr1.Sr.Dri.Cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologique-solidaire.gouv.fr

