

LA REVUE DE L'INSTITUT VEOLIA

FACTS REPORTS

2020

QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR : RELEVER LES DÉFIS DE L'INVISIBLE



En partenariat avec

nomadéis

REGARDS CROISÉS POUR ÉCLAIRER LE FUTUR

L'INSTITUT VEOLIA

Plateforme d'échanges et de débats, l'Institut Veolia mène un travail prospectif sur les enjeux au carrefour de l'environnement et de la société, depuis sa création en 2001. Sa mission est de proposer des regards croisés pour éclairer le futur.

En lien avec le monde académique international, l'Institut Veolia apporte des éclairages multidisciplinaires sur le monde en mutation. Il analyse les enjeux environnementaux et sociétaux des prochaines décennies, notamment ceux liés à l'évolution des modes de vie urbains et aux modes de production et consommation durables (villes, services urbains, environnement, énergie, santé, agriculture, etc.).

Au fil des ans, l'Institut Veolia a tissé un réseau international de haut niveau, formé d'experts, intellectuels et scientifiques, d'universités et d'organismes de recherche, d'autorités publiques, d'ONG, d'organisations internationales, etc. L'Institut intervient via ses publications et ses conférences ainsi que ses groupes de réflexion prospectifs.

Reconnu comme une plateforme légitime sur les enjeux globaux, l'Institut Veolia a été admis comme « Observateur ONG » par la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

LE COMITÉ DE PROSPECTIVE

Grâce à la réputation internationale de ses membres et à leur expertise, le Comité de prospective guide les travaux et le développement de l'Institut.

Le Comité de prospective est actuellement composé d'**Harvey Fineberg**, Président de la Gordon and Betty Moore Foundation et ancien Président de l'Académie nationale de médecine des États-Unis ; **Pierre-Marc Johnson**, Avocat international et ancien Premier Ministre du Québec ; **Philippe Kourilsky**, Directeur général honoraire de l'Institut Pasteur ; **Mamphela Ramphela**, ancienne Directrice générale de la Banque Mondiale ; **Amartya Sen**, Prix Nobel d'économie et Professeur à l'université Harvard et **Nicholas Stern**, Professeur d'économie à la London School of Economics, Fellow à l'Académie britannique et la Royal Society.

LA REVUE

La revue de l'Institut Veolia - FACTS Reports est une publication internationale de haut niveau facilitant les regards croisés sur des sujets au carrefour de la société et de l'environnement.

Cette revue, créée en 2007, a été lancée pour promouvoir et faciliter la diffusion de bonnes pratiques mises en œuvre sur le terrain, afin de contribuer à résoudre des problèmes liés au développement, à l'économie, la santé, l'environnement, l'agriculture et l'éducation, dans les pays développés et en développement.

La revue interdisciplinaire réunit et diffuse les expériences et expertises de différents acteurs (chercheurs, experts académiques, pouvoirs publics, entreprises, ONG, organisations internationales, etc.) afin de profiter d'une pluralité de regards sur un sujet donné, en combinant les retours d'expérience de bonnes pratiques issues d'acteurs de terrain et des analyses d'experts.

*Revue coordonnée
par Cédric Baecher,
Fanny Sohui, Leah Ball
et Octave Masson,
Nomadéis*

SOMMAIRE

P.02

AVANT-PROPOS

Philippe Kourilsky
Institut Pasteur

P.03

INTRODUCTION

Nicolas Renard
Institut Veolia

P. 04

Changer de paradigme pour répondre aux enjeux de la qualité de l'air intérieur

Cédric Baecher,
Nicolas Dutreix
Nomadéis

1. La qualité de l'air intérieur : un problème de santé publique aux multiples facettes

P. 08

Maîtriser la qualité de l'air intérieur pour préserver la santé des occupants

Docteur Fabien Squinazi
Haut conseil pour la Santé publique
Observatoire de la qualité de l'air intérieur

P. 24

Usager du métro : ce que vous devez savoir sur la qualité de l'air

Teresa Moreno
Fulvio Amato
Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA)

P. 14

La transition énergétique pour une meilleure qualité de l'air : un enjeu de santé publique

Maria P. Neira
Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

P. 28

Que respirons-nous dans nos voitures ? Caractérisation des polluants s'infiltrant dans les habitacles des véhicules

Amine Mehel
ESTACA'Lab

P. 18

L'Observatoire de la qualité de l'air intérieur : un outil unique pour comprendre la pollution de l'air des lieux de vie

Corinne Mandin
Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

2. Agir pour un air intérieur sain : de la mesure à la remédiation

P. 36

Surveiller, informer, comprendre, innover : le rôle d'Airparif, association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air

Karine Léger
Airparif

P. 40

L'architecture face aux enjeux de qualité de l'air intérieur

Dietmar Feichtinger
Feichtinger Architectes

P. 44

Du constat à l'action : comment garantir un air de qualité dans un bâtiment

Sabine Fauquez
Frédéric Bouvier
OFIS Veolia

P. 54

Purifier l'air intérieur grâce aux plantes et bactéries : les expériences de la NASA et du projet Biosphere 2

Bill C. Wolverton
NASA et Wolverton Environmental Services

Mark Nelson
Institute of Ecotechnics, Space Biosphere Ventures (Biosphere 2) et Wastewater Gardens International

P. 60

Intelligence artificielle et qualité de l'air intérieur : les nouvelles technologies au service de la santé

Yann Boquillod
AirVisual

3. Des perceptions citoyennes aux politiques publiques : faire connaître une pollution invisible

P. 66

Perception citoyenne de la qualité de l'air intérieur en Chine, Belgique et France : chronique de la découverte d'un ennemi invisible

Laurence Bedeau
ELABE

P. 76

Un effort multipartite et mondial pour lutter contre la pollution de l'air dans le monde

Helena Molin Valdés
Coalition pour le Climat et l'Air Pur (CCAC)

P. 82

Corée du Sud : des politiques publiques concrètes face à la pollution de l'air intérieur

Dr. Dong Hwa Kang
Université de Séoul

P. 86

À qui appartient l'air ? Le marché du carbone et l'art multimédia contemporain

Andrea Polli
Université du Nouveau-Mexique

P. 90

Pollution Pods : quand l'art change notre perception du changement climatique et de la pollution de l'air

Michael Pinsky
Laura Sommer
Université norvégienne des sciences et de la technologie

AVANT-PROPOS

Philippe Kourilsky - Directeur général honoraire de l'Institut Pasteur, Biologiste, Professeur émérite au Collège de France, Membre du Comité de prospective de l'Institut Veolia



En 1975, j'étais un jeune chercheur lorsque, par une heureuse erreur de casting, je me retrouvais aux côtés d'éminentes personnalités dans la première délégation scientifique française officiellement accueillie en Chine. Mao Zedong régnait encore sur un pays qui commençait juste à s'ouvrir. Passionnant voyage, durant lequel, pour illustrer les

mérites de la médecine chinoise traditionnelle, on nous montra de la chirurgie sous acupuncture. C'était impressionnant : une seule aiguille était fichée dans le pied d'un homme, qui parlait tranquillement pendant qu'on lui découpait le thorax à la scie. Dans la salle d'opération rudimentaire, on ouvrait la fenêtre entre deux opérations, pour faire entrer de l'air « pur » et évacuer microbes et miasmes.

Cette anecdote me revient en mémoire, à la lecture de ce remarquable numéro de la Revue de l'Institut Veolia - *FACTS Reports*, parce qu'elle illustre la volatilité de notre perception de la « pureté » de l'air. Or, ce numéro nous invite à revoir les fondements de la qualité de l'air que nous respirons, en milieu ouvert ou confiné.

En apparence, quoi de plus simple que l'air ? De mieux partagé ? De plus fondamental ? De plus vital ? Pourtant, dans les faits, l'air est divers, l'air est complexe. L'air pourrait n'être qu'un sujet d'intérêt pour les poètes, et pas pour les chimistes, tant sa composition est prétendument élémentaire. Il n'en est rien. On ne devrait pas parler de l'air, mais *des airs*. Il en va de l'air comme de l'eau. L'air est singularisé et diversifié par ses impuretés : polluants moléculaires, microparticules, microbes, etc. Leurs sources sont aussi multiples que leurs effets : l'air pollué salit les façades de bâtiments que les citadins s'agacent de devoir ravalier si fréquemment ; il nuit à la santé, et provoque la perte de nombreuses journées de vie ; c'est encore d'une forme de pollution de l'air que provient le réchauffement climatique.

On recherche les causes : ici, l'automobile, le diesel, l'usure des pneus ; là, la production de méthane par les vaches et les rizières. On a besoin de solutions dans tous les lieux de vie et de travail : villes, usines, avions, bureaux, champs, décharges... On recherche aussi des coupables : trop vite, on accuse pêle-mêle des industriels conscients des dégâts qu'ils provoquent par recherche du profit, des politiques incompétents ou complices qui ferment les yeux par intérêt ou appétit du pouvoir... Pourtant, nous, citoyens, sommes tous concernés. Nous devons être plus conscients des problèmes et des enjeux associés à la qualité de l'air. C'est l'objet de la première partie de ce numéro.

La seconde partie expose plusieurs pistes de recherche et débuts de solution. La science avance. À l'ère du numérique, la récolte massive de données avec des capteurs de plus en plus performants permet d'analyser des problèmes d'une complexité croissante, laquelle interdit qu'on puisse leur apporter des solutions simples et uniques. La biologie a son mot à dire parce que les plantes et les microorganismes ont des capacités de régénération considérables et encore sous-exploitées. L'architecture aussi : lorsqu'elle est bien adaptée, elle est en effet un instrument de prévention et d'amélioration.

La dernière partie du numéro, plus prospective, discute de l'aménagement des normes et réglementations, en matière de santé publique notamment, de la diffusion des bonnes pratiques et de leur harmonisation à l'échelle mondiale.

Notre futur sera ce que nous en ferons. L'air est l'un des biens publics mondiaux les plus fondamentaux. C'est si évident que nous l'ignorons trop souvent. Ce numéro nous invite à nous y intéresser plus avant. Et pas de façon superficielle : cette composante princeps de notre environnement pose de nombreux problèmes, qui, individuellement et collectivement, méritent que nous nous en saisissions durablement, pour mieux connaître, mieux comprendre et mieux agir.

INTRODUCTION

Nicolas Renard - Directeur de la prospective, Institut Veolia



Bien qu'invisible, la pollution de l'air est l'un des principaux risques environnementaux. À l'échelle planétaire, son coût humain est dramatique : il s'élève à 8 millions de décès prématurés par an, ce qui en fait le 4^e facteur de risque de mortalité. Agir pour préserver la qualité de l'air extérieur est nécessaire, mais il est indispensable d'en faire autant pour l'air intérieur. Pourquoi cela ? Parce que

nous passons la plupart de notre existence dans des bâtiments et que près de la moitié des 8 millions de décès imputables à la mauvaise qualité de l'air sont dus à l'air intérieur.

Ce que beaucoup ignorent, c'est que l'air intérieur est en général plus pollué que l'air extérieur. Comment expliquer ce paradoxe ? A la pollution de l'air extérieur s'ajoute celle des produits utilisés à l'intérieur pour l'entretien ou la cuisine, ainsi que les émanations des peintures, des revêtements des murs et des sols... La liste des polluants intérieurs s'égrène, interminable : xylènes, benzène, composés organiques volatils, formaldéhyde, ozone, particules fines, allergènes... Autre paradoxe : on est plus exposé aux polluants dans le métro qu'en surface, lorsque l'on se déplace à pied ou en voiture. A Barcelone, à Hong Kong, à Mexico, à Istanbul ou encore à Santiago du Chili, pour un même trajet, une personne inhale davantage de particules fines en utilisant le métro qu'en prenant le bus ou qu'en marchant.

Pourtant, l'essentiel est ailleurs. 3 milliards de personnes, soit 40 % de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à des combustibles et des technologies propres pour faire la cuisine, se chauffer et s'éclairer. Aussi, en termes de santé publique, la priorité consiste à faciliter l'accès de tous à une énergie propre à domicile. Pour y parvenir, deux types d'obstacles sont à surmonter : économiques, parce que les énergies et technologies propres sont plus chères que les autres ; politiques, parce que, dans certains pays, la législation n'impose pas d'électrifier les villages.

La triste arithmétique de la mauvaise qualité de l'air et des décès associés ne doit pas masquer les avancées récentes. Dans les pays développés, la question des émissions des industries a été saisie à bras le corps par les pouvoirs publics et les industriels, permettant de réduire drastiquement les pollutions. Autre progrès : la diminution des consommations d'essence des voitures et de leurs émissions gazeuses - bien qu'en partie gommée par l'accroissement du trafic routier -, et l'émergence prometteuse des véhicules électriques.

Mais aujourd'hui, la pollution de l'air tue plus que le tabac, avec une différence notable : on peut cesser de fumer, on ne peut pas cesser de respirer un air pollué. Partout dans le monde, lutter contre cette pollution est devenu un enjeu majeur de santé publique et de qualité de vie. Le chantier est vaste, immense même, puisque les trois quarts de la population mondiale respirent un air extérieur ou intérieur non conforme aux recommandations de l'OMS. D'où la nécessité de cibler d'abord les populations les plus exposées et vulnérables, notamment les enfants. Le premier levier d'action consiste à mesurer la qualité de l'air intérieur, afin de rendre visible l'invisible et de déterminer par où attaquer le problème, chaque bâtiment possédant ses particularités selon sa structure et ses équipements, selon qu'on l'habite ou qu'on le fréquente temporairement. Une fois les sources de pollution de l'air intérieur identifiées, il faut les neutraliser ou traiter les flux d'air circulant dans les bâtiments avec des procédés *High Tech*, reposant par exemple sur l'intelligence artificielle, ou *Low Tech* telle que la phytoremédiation. Sans oublier que l'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe aussi par celle de l'air extérieur. A long terme, la véritable solution réside dans la prévention généralisée.

Il existe des solutions efficaces pour que le droit de respirer un air sain devienne une réalité pour tous

Comme les océans, l'air est un bien commun dépourvu de frontières, ouvert à tous, dans lequel chacun peut être tenté de rejeter ses polluants. Et comme les océans, sa protection souffre d'un manque de gouvernance. À qui appartient-il ? Quel organisme a la responsabilité d'en préserver la qualité ? Quelles normes lui sont applicables ? Si la qualité de l'air extérieur fait l'objet de plans d'action ambitieux, la qualité de l'air intérieur demeure, elle, un des grands oubliés des

politiques environnementales. Rares sont les pays ayant érigé une réglementation sur ce thème. Mais on y viendra, car cette pollution sournoise et méconnue est désormais sous les feux de la rampe. Les ventes de purificateurs d'air particuliers explosent dans les villes polluées des pays émergents, la Chine a engagé un vaste programme pour « *la défense du ciel bleu* », les écoles commencent à se barder de capteurs... Avec la réglementation, viendra également la judiciarisation de ce thème. Déjà des actions en justice sont engagées contre des états, des villes et des écoles pour insuffisante qualité de l'air.

Lorsqu'on purifie l'air, on protège le présent et l'avenir. Dans ce domaine comme dans les autres domaines de l'environnement, il n'y a pas de fatalité : il existe des solutions efficaces, pour que le droit de respirer un air sain devienne une réalité pour tous.

Changer de paradigme pour répondre aux enjeux de la qualité de l'air intérieur



Cédric Baecher
Co-fondateur de Nomadéis



Nicolas Dutreix
Co-fondateur de Nomadéis

Pendant longtemps, les sujets du climat et de la qualité de l'air ont été traités de manière indépendante. Pourtant, plusieurs travaux scientifiques ont clairement démontré que la pollution atmosphérique et le climat sont indissociables et exercent une influence l'un sur l'autre. Leurs impacts sanitaires et sociaux sont également de plus en plus pris en considération par la population mondiale. L'actualité le confirme : au début du mois de novembre 2019, la mégalopole de New Delhi en Inde a été touchée par des épisodes de pollution de l'air très violents, dus à la fois à la circulation automobile, aux rejets industriels et aux fumées des brûlis agricoles des régions voisines. La concentration en particules fines par mètre cube d'air enregistrée a atteint des seuils trente-deux fois supérieurs aux recommandations¹ de l'OMS².

Conséquence à haute portée symbolique : des bars à oxygène proposent désormais aux habitants de la capitale indienne de payer pour respirer un air pur durant 15 minutes³. Autre exemple : en France, en septembre 2019, l'incendie de l'usine

Lubrizon⁴ à Rouen a relancé le débat des impacts de la qualité de l'air sur les plans sanitaires et environnementaux⁵.

Les réactions face à ces événements sont multiples, et émanent d'acteurs aux profils diversifiés : le 5 juin dernier, l'ONU organisait la journée mondiale de l'environnement de l'année 2019 autour du thème de la pollution de l'air, et s'exprimait ainsi à travers les mots de son secrétaire général Antonio Guterres : « *En cette Journée mondiale de l'environnement, je prie chacun et chacune d'entre nous d'agir pour que nous puissions mieux respirer. Que ce soit en faisant pression sur le monde politique et les entreprises ou en changeant nos habitudes, nous pouvons réduire la pollution et contrer les changements climatiques* »⁶.

La recherche scientifique et le monde académique ont également contribué à vulgariser le sujet et ses déterminants, en publiant des études de référence. Du côté de la société civile, on constate l'émergence et le développement de mouvements de protestation : à Londres en mars 2018, des membres du collectif « *Stop Killing Londoners* » ont été arrêtés après avoir tagué sur les murs des bureaux du maire de Londres des inscriptions dénonçant la pollution de l'air et appelant à la réaction politique⁷.

La méfiance grandissante face au manque d'information et de transparence a poussé la société civile à se rassembler dans des réseaux, collectifs et associations, devenus des acteurs incontournables de la problématique de la qualité de l'air. Constituées dans les années 70 en France avec pour but notamment de défendre les intérêts collectifs, les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) sont présentes dans chaque région administrative du pays et mesurent chaque jour la pollution des principales agglomérations. L'Association de Promotion de la Qualité de l'Air Intérieur (AQPAl), ou, très récemment (en réaction à l'incendie de l'usine Lubrizol) le collectif « Rouen Respire » sont des exemples d'associations françaises qui se sont saisies du sujet et se font les porte-parole d'une opinion publique en attente de mesures concrètes. L'impact politique est grandissant : le 24 octobre 2019, la France a été condamnée par la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) pour manquement à ses obligations issues de la directive qualité de l'air de 2008 et pour

1 L'ambassade américaine dans la capitale indienne a enregistré le 3 novembre 2019 une concentration de 810 microgrammes de particules fines PM_{2,5} par mètre cube d'air, soit un taux plus de trente-deux fois supérieur aux recommandations. https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/11/03/a-new-delhi-un-brouillard-de-pollution-si-dense-que-les-avions-ne-peuvent-plus-atterrir_6017863_3244.html

2 Organisation mondiale de la Santé.

3 https://www.liberation.fr/checknews/2019/11/18/pollution-de-l-air-qu-est-ce-que-le-bar-a-oxygene-lance-a-new-delhi_1764051

4 L'incendie de l'usine Lubrizol à Rouen a eu lieu le 26 septembre 2019 dans une usine de produits chimiques de la société Lubrizol classée Seveso seuil haut (« à haut risque ») ; cette usine synthétise et stocke des produits chimiques destinés à être utilisés comme additifs pour lubrifiants.

5 https://www.lemonde.fr/idees/article/2019/10/18/incendie-de-rouen-l-autre-risque-de-pollution-potentiellement-bien-plus-dangereux-concerne-les-emissions-quotidiennes-de-ces-industries_6015949_3232.html

6 <https://www.un.org/fr/events/environmentday/sgmessage.shtml>

7 <https://www.theguardian.com/environment/2018/mar/19/london-air-pollution-activists-prepared-to-go-to-prison-to-force-action>

son incapacité à protéger ses citoyens contre la pollution de l'air. La France n'est pas un cas isolé : d'autres États membres, dont l'Allemagne et le Royaume-Uni, sont également poursuivis par la CJUE. Enfin, le secteur privé se saisit du sujet dans l'ensemble des grands secteurs d'activités (industrie, transport, agriculture, résidentiel-tertiaire...). De la grande entreprise à la startup, le marché de la qualité de l'air est investi par de nombreux acteurs et fait l'objet d'une innovation technique et technologique grandissante, avec le développement de capteurs connectés, d'applications ou encore de systèmes de remédiation. Les stratégies de responsabilité sociétale (RSE) évoluent également, pour intégrer les défis liés à la qualité de l'air et faire évoluer les comportements.

C'est en accompagnant cette diversité d'acteurs depuis plusieurs années que Nomadéis a progressivement développé une expertise spécifique sur le sujet de la qualité de l'air.

Les travaux qui nous ont été confiés ont d'abord porté sur les enjeux relatifs à la pollution de l'air extérieur. Nous avons ainsi réalisé en 2015, en collaboration avec une équipe d'enseignants-chercheurs de l'université de La Rochelle, une étude de marché pour l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES) française, visant à caractériser techniquement et économiquement un ensemble de dispositifs revendiquant une protection individuelle contre la pollution de l'air extérieur, à destination du grand public et des professionnels⁸. Nous avons également été amenés à travailler sur la question complexe de la gouvernance relative à l'amélioration de la qualité de l'air : afin de favoriser les échanges et créer des synergies entre acteurs, nous avons accompagné en 2018 l'association ATMO Normandie pour une étude de préfiguration visant à créer un « Air lab », dans le but de faire émerger un écosystème régional sur la thématique de la qualité de l'air⁹.

En parallèle, nous avons été sollicités pour conduire des études sur la qualité de l'air intérieur. Ce marché, qui comporte des enjeux sanitaires, sociaux et environnementaux tout aussi importants que ceux de l'air extérieur, offre en effet de réelles possibilités d'action et de remédiation grâce à un cadre plus maîtrisé, qui reste néanmoins particulièrement complexe. L'un des principaux enjeux relatifs à ce marché porte sur le foisonnement de solutions et dispositifs revendiquant une amélioration voire une épuration de l'air intérieur, avec de nombreuses incertitudes quant à leur fonctionnement effectif et leur efficacité.

Nous avons ainsi contribué à différentes études de l'ANSES pour cartographier ces solutions et faire état des connaissances disponibles. Il ressort de ces travaux que des progrès demeurent nécessaires pour renforcer et démontrer l'efficacité réelle de nombreux dispositifs aujourd'hui commercialisés. Par ailleurs, des progrès doivent également être réalisés au niveau du cadre réglementaire, afin de garantir la performance des dispositifs et s'assurer qu'ils soient adaptés aux différents usages du grand public. Dans un contexte similaire, et avec une interrogation sur le potentiel mais aussi sur les conditions permettant la mise en œuvre et le succès d'initiatives en matière de qualité

de l'air, nous avons accompagné l'Urban Lab, le laboratoire d'expérimentation de la Ville de Paris (Paris&Co), dans l'évaluation de 10 solutions innovantes allant de la vignette connectée aux micro-capteurs, en passant par des solutions de dépollution de l'air par biofiltration. Nous avons suivi des porteurs de projet qui cherchaient à tester leurs solutions sur le territoire francilien en identifiant les configurations les plus prometteuses, en conduisant une analyse quantitative et qualitative des impacts observés, et en identifiant une série de facteurs clés de réussite et freins au déploiement de ces expérimentations. Toujours dans l'optique d'appuyer les pouvoirs publics dans leur mission de conception et de mise en application de politiques publiques efficaces en matière de qualité de l'air, nous avons réalisé, pour le compte de l'ADEME et des Ministères de l'environnement et de la Santé, une étude comparative des politiques publiques visant à préserver et améliorer la qualité de l'air intérieur, en Europe et dans le monde. Les conclusions ont fourni un appui à la décision pour la mise en application des Plans Nationaux et Régionaux Santé Environnement III (PNSE / PRSE III)¹⁰.

Toutes ces expériences nous ont amenés à aborder la thématique de la qualité de l'air, en particulier intérieur, comme un enjeu multifactoriel, nécessitant une approche transversale. Si l'innovation technologique est requise et indispensable pour répondre en grande partie à la problématique, elle ne peut suffire seule : la mesure de la qualité de l'air n'est pas une fin en soi. Elle doit avoir un sens précis et être utilisée pour renforcer la sensibilisation de tous les acteurs et objectiver l'impact d'actions de remédiation.

De même, les dispositifs de remédiation ne peuvent fonctionner de façon réellement efficace qu'à condition d'être accompagnés de mesures visant à faire évoluer les comportements. La qualité de l'air intérieur doit ainsi (surtout ?) devenir une thématique incontournable pour l'ensemble des parties prenantes et être abordée à la fois sous les angles de la connaissance, de la sensibilisation et de la pédagogie. Il existe également un enjeu fort pour doter les acteurs (aussi bien entreprises qu'associations ou organismes publics) d'interlocuteurs dédiés et de cadres de compréhension et d'analyse pertinents et partagés, afin d'éviter la dilution des responsabilités et la méconnaissance des enjeux.

L'ensemble des dispositifs de mesure et de remédiation mis en œuvre ne doit pas masquer l'enjeu principal concernant la qualité de l'air : celui de la réduction des émissions polluantes. Ce défi mondial implique une transformation de nos modes de production, de consommation, de déplacement, et plus généralement de nos modes de vies, en alignement avec l'enjeu du millénaire que représente la transition énergétique, écologique et solidaire.

Nous espérons que cette édition de la revue FACTS, réalisée en partenariat entre l'Institut Veolia et Nomadéis, contribuera à une meilleure compréhension des enjeux, au service de toutes les parties prenantes.

8 <http://www.nomadeis.com/2016/10/qualite-air-exterieur-anses/>

9 <http://www.nomadeis.com/2018/09/air-lab-normandie/>

10 <http://www.nomadeis.com/2016/01/qualite-air-interieur-ademe/>

1. LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR : UN PROBLÈME DE SANTÉ PUBLIQUE AUX MULTIPLES FACETTES



La pollution de l'air intérieur concerne une grande variété d'environnements clos, (logements, bureaux, écoles ou encore transports), où nous passons en moyenne 80 % de notre temps. Qu'elle soit due aux combustibles domestiques, à la présence de matériaux toxiques et de produits chimiques ou aux polluants provenant de l'air ambiant, ses effets sur la santé peuvent être extrêmement nocifs : l'OMS évalue à 3,8 millions le nombre de décès annuels causés par un air intérieur de mauvaise qualité au niveau mondial.

LIEUX DE VIE, MOYENS DE TRANSPORTS : DES POLLUTIONS DIVERSES

La pollution de l'air intérieur résulte de l'interaction de multiples facteurs. Corinne Mandin, responsable de l'Observatoire français de la Qualité de l'Air Intérieur, expose la complexité de cette pollution : on recense actuellement plus de 2 700 substances potentiellement toxiques, qui varient selon les espaces concernés. Les polluants chimiques, biologiques ou physiques peuvent provenir de l'air ambiant extérieur, d'un sol pollué par une activité industrielle, des constituants du bâtiment et équipements, ou encore des activités des occupants eux-mêmes. Des études de caractérisation spécifiques sont ainsi nécessaires. Dans le secteur des transports, Amine Mehel, chercheur au sein du laboratoire de l'ESTACA, présente une méthodologie pour quantifier et analyser les types de pollutions présentes dans l'habacle d'une voiture. Le cas du métro souterrain, où les concentrations de particules fines dépassent dans certaines villes les seuils recommandés, est également analysé par Teresa Moreno et Fulvio Amato de l'Institute of Environmental Assessment and Water Research à Barcelone.

DES IMPACTS VARIÉS SUR LA SANTÉ : DE LA GÊNE À L'INTOXICATION

Aussi diversifiés que les polluants qui en sont la cause, les effets sanitaires de la pollution de l'air ont été démontrés par de nombreuses études. Comme l'explique le docteur Fabien Squinazi, expert de plusieurs commissions du ministère de la Santé français, il est fréquent qu'un air intérieur vicié soit à l'origine de symptômes variés (irritations des yeux, du nez et des voies respiratoires, maux de tête ou nausées, fatigue) : un Français sur deux serait concerné. L'exposition quotidienne à

un air intérieur très pollué augmente également la probabilité de développer des affections plus graves : pneumonies et autres pathologies respiratoires, mais également maladies cardiovasculaires ou cancers. Certaines études alertent également sur les impacts sociaux et économiques engendrés par un air malsain, affectant par exemple la productivité des salariés ou la capacité de concentration des étudiants.

QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Si tous les pays sont concernés par la pollution de l'air intérieur, les enjeux ne sont pas les mêmes en fonction des contextes économiques et énergétiques. De nombreux pays à revenus faibles ou intermédiaires sont en particulier confrontés à une pollution aux particules fines très nocive pour les voies respiratoires, qui est due à l'utilisation de sources d'énergie polluantes pour se chauffer ou cuisiner et qui impacte particulièrement les populations les plus vulnérables (femmes, enfants). Face à ce constat, Maria Neira, Directrice du Département de la santé publique, de l'environnement et des déterminants sociaux de la santé de l'Organisation Mondiale de la Santé, rappelle la nécessité de favoriser l'accès à des sources d'énergie moins dangereuses pour la santé et l'environnement.

Cédric Baecher, Fanny Sohui,
Leah Ball et Octave Masson,
Coordinateurs,
Nomadéis

MAÎTRISER LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR POUR PRÉSERVER LA SANTÉ DES OCCUPANTS

Docteur Fabien Squinazi,

Ancien Directeur du Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris
Membre du Haut Conseil de la santé publique
Membre du conseil scientifique de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur
Médecin biologiste



Remplacement d'un filtre de ventilation

Fabien Squinazi est médecin biologiste, ancien biologiste des hôpitaux, ancien directeur du Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris et ancien chef du Bureau de la santé environnementale et de l'hygiène à la Mairie de Paris. Membre de différentes commissions au ministère de la Santé (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section des milieux de vie, groupe Bâtiment – santé, comité technique plomb et comité d'experts « déchets d'activités de soins ») et à l'Agence nationale de sécurité sanitaire (comité d'experts spécialisés « milieux aériens » et groupes de travail), il est aujourd'hui membre du conseil scientifique de l'Observatoire national de la qualité de l'air intérieur, du Haut Conseil de la santé publique dans la commission « Risques liés à l'environnement », membre correspondant de l'Académie nationale de pharmacie (6^e section santé environnementale) et de plusieurs associations en lien avec les sujets suivants : santé environnement, Haute Qualité Environnementale des bâtiments, asthme et allergies, prévention de la pollution atmosphérique, prévention et étude de la contamination des salles propres, métiers de l'environnement aérien. Il a publié plusieurs articles et ouvrages sur la qualité de l'air et la qualité de l'eau.

La dégradation de la qualité de l'air intérieur peut se manifester par diverses pathologies liées au développement de micro-organismes ou à la présence de polluants ou d'allergènes. D'autres symptômes collectifs non spécifiques, affectant plusieurs sphères de l'organisme (ORL, oculaire, respiratoire, cutanée, neurologique, etc.) peuvent survenir dans un bâtiment et disparaître lorsque les personnes qui se plaignent le quittent. Dans les deux cas, une enquête médicale et environnementale permettra d'identifier les aspects cliniques puis de rechercher les sources de pollution et de dysfonctionnement du système de ventilation. Les résultats de l'enquête et l'interprétation des concentrations observées par rapport à des valeurs de référence permettront de fournir des éléments pour une compréhension des problèmes rencontrés. Il existe aujourd'hui différents outils de maîtrise et d'évaluation de la qualité de l'air intérieur lors de la construction ou de la rénovation d'un bâtiment et lors de l'exploitation. On distingue trois principales catégories : 1/ des démarches préventives prenant en compte les sources de pollution (intérieures et extérieures au bâtiment) et le système de ventilation, 2/ des protocoles de mesure de divers paramètres à réception ou en exploitation et 3/ des instruments de mesure fournissant des informations continues sur la qualité de l'air intérieur.

L'ÉMERGENCE DU *SICK BUILDING SYNDROME*

L'air intérieur correspond aux environnements clos intérieurs non industriels qui comprennent les habitations, les établissements recevant du public, les lieux de garde et d'enseignement, les établissements de santé et médico-sociaux, et les moyens de transport. Vivre, fréquenter, étudier ou travailler dans ces environnements intérieurs peut être à l'origine de signalements de désagréments ou de troubles de santé par les usagers ou les occupants.

Les autorités sanitaires françaises sont de plus en plus souvent confrontées à des « épidémies de symptômes inexplicables », qui surviennent dans des lieux de travail et dans des bâtiments publics tels que des écoles ou des hôpitaux. Ces syndromes collectifs non spécifiques, communément nommés « syndrome des bâtiments malsains » (*sick building syndrome*), sont à distinguer des maladies spécifiques directement liées au bâtiment (*building-related illness*), qui présentent un tableau clinique homogène, des anomalies cliniques ou biologiques objectives et pour lesquelles un ou plusieurs agents sont identifiables par le médecin¹ : pathologies infectieuses (légionellose, maladies grippales et rhume, tuberculose), immunologiques (pneumopathie d'hypersensibilité) ou allergiques (rhinite allergique, asthme, dermatite atopique, urticaire de contact). Les agents en cause sont des bactéries, virus, champignons, actinomycètes, moisissures et des allergènes d'acariens, de blattes, d'animaux domestiques, etc.

Par opposition au *building-related illness*, le *sick building syndrome* provoque des symptômes divers, non spécifiques, qui peuvent être variables d'une personne à l'autre, y compris au cours d'un même épisode. Les personnes peuvent présenter de nombreuses rechutes, en particulier chaque fois qu'elles retournent dans les lieux où les symptômes ont démarré. Les symptômes sont généralement subjectifs : l'examen clinique des personnes qui se plaignent ne révèle pas d'anomalie objective et les résultats des examens complémentaires pratiqués sont normaux. Les plaintes peuvent concerner différents organes et sont souvent polymorphes. Chaque personne peut présenter différents signes cliniques, se combinant parmi cinq catégories :

1. Symptômes affectant les muqueuses et les voies respiratoires supérieures : les yeux (irritation, sécheresse, picotements, démangeaisons, sensation de brûlure, larmolements), le nez (irritation, sécheresse, congestions, éternuements, saignements), ou la gorge (irritation, sécheresse, voix enrouée ou modifiée, toux) ;
2. Symptômes affectant le système respiratoire profond : oppression thoracique, respiration sifflante, essoufflements, crise d'asthme, etc. ;
3. Symptômes affectant la peau tels que sécheresse, démangeaisons, éruptions, sensations de brûlure ou de pression sur le visage, peau du visage sèche ou rouge ;

4. Symptômes affectant le système nerveux central provoquant fatigue, difficultés de concentration, somnolence, tête lourde, maux de tête, étourdissements, sensations vertigineuses, nausées ;
5. Symptômes de gêne extérieure (odeurs déplaisantes, modification du goût).

Les manifestations de gêne, d'inconfort ou de symptômes ressentis à l'intérieur d'un bâtiment ont la particularité d'être améliorées après la sortie des locaux incriminés, de toucher en priorité les personnes vulnérables et de favoriser les exacerbations cliniques chez des personnes souffrant déjà de pathologies allergiques, respiratoires, oculaires ou cutanées.

UNE ORIGINE MULTIFACTORIELLE AU *SICK BUILDING SYNDROME*

De nombreuses publications scientifiques^{2,3} relatent des associations entre certains facteurs environnementaux ou psychosociaux et la survenue de ces symptômes. Mais plusieurs auteurs^{4,5} s'accordent à penser que tous ces facteurs peuvent jouer un rôle sans qu'aucun d'eux suffise à expliquer à lui seul les phénomènes sanitaires observés. On parle ainsi de « pathologie multifactorielle »⁶ combinant :

- Des facteurs environnementaux : présence de polluants intérieurs, comme les composés organiques volatils dont les aldéhydes, les particules et les fibres, le dioxyde d'azote, l'ozone, les moisissures liées à l'humidité, défaillances de la ventilation, température inconfortable, hygrométrie trop faible, éclairage inadéquat, suroccupation des locaux, etc. ;
- Des facteurs de risques individuels : terrain immunitaire favorable, sécheresse cutanée préexistante, port de lentilles de contact ;
- Des facteurs psychosociaux : management trop distant ou au contraire restreignant l'autonomie des personnels, stress du fait d'une charge de travail trop lourde, de rapports difficiles avec la hiérarchie ou des collègues de travail, travail ennuyeux, manque d'intimité ;
- L'influence relative de ces différents facteurs peut évoluer au cours du temps, en particulier si le problème initial génère une crise lorsque les premiers éléments de gestion ne permettent pas de mettre fin aux symptômes signalés. De nombreux facteurs sociaux deviennent susceptibles d'amplifier la crise.

Outre les conséquences qui peuvent être très néfastes sur la santé, le *sick building syndrome* provoque également une détérioration de la performance, celle des employés de bureaux, mais aussi celle des enfants dans le cadre scolaire.

1 Institut de Veille Sanitaire. Diagnostic et prise en charge des syndromes collectifs inexplicables. Guide technique. 2010.

2 Burge PS. Sick building syndrome *Occup Environ Med* 2004, 61,185-190

3 WHO, Indoor air quality: biological contaminants. WHO regional publications. European series no. 3. WHO, 1990:1-54

4 Mendell MJ, Fisk WJ. Is health in office buildings related only to psychosocial factors? *Occup Environ Med* 2007, 64 (1) : 69-70

5 Baker DB. Social and organizational factors in office building-associated illness. *Occup Med* 1989, 4 (4): 607-24

6 Lahtinen M., Huuhtanen, Reijula. Sick Building syndrome and psychosocial factors – a literature review. *Indoor Air* 1998, 4, 71-80

LE CONFORT, LA SANTÉ ET LA PERFORMANCE AU TRAVAIL DANS LES IMMEUBLES DE BUREAUX

Une enquête, menée dans les immeubles de bureaux en Ile-de-France par la Société de Médecine du Travail de l'Ouest de l'Ile-de-France et le Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris,⁷ a permis de mieux caractériser les plaintes des salariés en s'appuyant sur un auto-questionnaire d'enquête médicale distribué aux salariés à l'occasion de leur visite chez le médecin du travail. Deux études, effectuées en 1994 et en 1995, ont permis de recueillir 4 276 questionnaires en hiver et 2 152 en été. Les résultats ont été les suivants : une personne interrogée sur deux se plaignait de symptômes reliés au bâtiment : nez (25 %), yeux (24 %), gorge (19 %), maux de tête (17 %), peau (12 %), difficultés de concentration (10 %), fatigue anormale (8 %). L'enquête a également révélé de nombreuses sources d'insatisfaction : température des bâtiments (décriée par 60 % des répondants), qualité de l'air (58 %), bruit (42 %) et éclairage (35 %). Une seconde enquête, cette fois-ci nationale et réalisée selon le même format au cours de l'hiver 1996-1997 auprès de 3 953 salariés, a confirmé ces résultats.

Le projet européen OFFICAIR⁸, réalisé en 2010-2014 auprès de 1 190 répondants, a mis en lumière les mêmes sources d'insatisfaction, mais dans des proportions

différentes : température (35 %), qualité de l'air (38 %), bruit (44 %) et éclairage (27 %). Dans un sous-échantillon de cinq bâtiments⁹, les relations entre qualité de l'air intérieur et tests de performance au travail ont été étudiées. Il a été montré que les variables individuelles, comme l'âge et la prise d'un traitement médical restaient les principaux déterminants de la performance au travail. Autres résultats : les concentrations intérieures des xylènes et de l'ozone pourraient influencer les temps de réaction des salariés en période estivale. Par ailleurs, aussi bien en été qu'en hiver, la satisfaction vis-à-vis du bruit et de la possibilité de contrôler la température intérieure augmenteraient la productivité autoévaluée par les occupants.

Aux États-Unis, l'étude du professeur Fisk et de ses collaborateurs¹⁰ a mis en regard le coût d'un environnement intérieur non optimisé (en termes d'absentéisme, par exemple) avec les montants nécessaires à l'amélioration de cet environnement. Selon les différents scénarios d'amélioration envisagés, les bénéfices pourraient atteindre jusqu'à 17 milliards de dollars annuels pour l'ensemble du parc de bureaux américain.

7 Squinazi F, Lanfranconi I., Giard A.M. (1994) Confort et santé dans les bâtiments climatisés. Proposition d'un auto-questionnaire à utiliser par le médecin du travail. Documents pour le Médecin du Travail, n°60, 4ème trimestre, 1994, 341-352

8 Bartzis J. and al. European collaborative project OFFICAIR (2014) "On the reduction of health effects from combined exposure to indoor air pollutants in modern offices

9 Mandin C., BOERSTRA A., Le Ponner E. and al. (2017) Qualité de l'air intérieur et confort dans les espaces de bureaux, et relations avec la performance au travail. Volet français au projet OFFICAIR, Partie 2. Environnement, Risques & Santé, 16, n°6, 565-74

10 Fisk WJ, Black D, Brunner G (2011) Benefits and costs of improved IEQ in U.S. offices. Indoor Air, 21: 357-67

QUALITÉ DE L'AIR DES SALLES DE CLASSES ET PERFORMANCES SCOLAIRES DES ENFANTS

En 2007, Pawel Wargocki et David Wyon¹¹ ont mené en été deux études interventionnelles sur l'environnement dans deux salles de classe d'une école danoise occupées par des enfants âgés de 10 à 12 ans.

Les auteurs ont observé que la diminution de la température de 25°C à 20°C accroissait les performances obtenues aux résultats de deux exercices de calcul et de deux exercices basés sur le langage, semblables au travail scolaire. L'augmentation de la performance était principalement due à l'augmentation de la vitesse de réponse des enfants. Autres impacts positifs : le ressenti de la température par les élèves est passé de « légèrement trop chaud » à « neutre » ; et les enfants ont signalé moins de maux de tête à cette température plus basse, de façon significative. Un panel d'adultes entrant dans les salles de classe juste après le départ des enfants a également constaté une ambiance plus fraîche et plus acceptable à cette température plus basse.

En complément, le doublement du débit d'air neuf par personne de 5 L/s à 10 L/s augmentait également la performance des élèves de 15 % pour quatre exercices de calcul, en accroissant la vitesse de réponse tout en ne générant presque aucune erreur.

En parallèle, une étude européenne¹² portant sur 800 enfants dans huit écoles a montré en 1996 que les scores des élèves à des tests de concentration diminuaient lorsque le confinement (mesuré par le dioxyde de carbone) augmentait.

Ces résultats montrent que la mise en place de moyens pour empêcher l'élévation de température et pour augmenter la ventilation pourrait permettre d'améliorer les résultats scolaires des enfants.

11 Wargocki P., Wyon D.P. The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children. HVAC&R Research 2007, 13:2, 193-220

12 Myhrvold, A.N., E.Olsen, and O. Lauridsen 1996. Indoor Environment in Schools—Pupils' Health and Performance in regard to CO2 Concentrations. In Indoor Air '96. The Seventh International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Vol 4, pp. 369–371

L'ENQUÊTE ENVIRONNEMENTALE : UN DISPOSITIF QUI PERMET D'IDENTIFIER ET DE CARACTÉRISER LES ENJEUX RELATIFS À LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS

Une enquête environnementale est ouverte lorsque des travaux, des aménagements ou des ouvrages sont susceptibles, en raison de leur nature, d'affecter l'environnement. L'enquête environnementale s'ancre dans une double démarche¹³ :

- Une démarche médicale d'identification des symptômes non spécifiques ou des pathologies associées à la présence d'agents dans les locaux incriminés. La rencontre des interlocuteurs médicaux, gestionnaires, administratifs et techniques ; puis l'analyse chronologique des faits, doivent permettre d'identifier l'élément déclenchant les symptômes, la temporalité de ces derniers (durée, fréquence) et le nombre de personnes concernées. Il peut s'agir de la perception d'une odeur particulière, d'une perturbation de l'environnement engendrée par des travaux (bruit, poussière, modifications perçues comme nuisibles), d'une inquiétude générée par une personne malade dans l'entourage, etc. Certains éléments de contexte peuvent aussi favoriser le déclenchement des signalements : un environnement perçu comme dégradé (chantier à proximité,

mauvaise ergonomie du poste de travail), un contexte sociologique tendu (conflits sociaux sous-jacents, mauvaises conditions de travail, rapports hiérarchiques problématiques, situations de management défectueux...), un stress physique ou psychique inhabituel (déménagement, examens, réorganisation, situation économique difficile, perspective de compression de personnel...).

- Une démarche technique comportant une visite des locaux incriminés et de leurs annexes, avec la recherche des sources potentielles de pollution. L'évaluation doit prendre en compte les émissions potentielles des matériaux de construction, des revêtements (des murs, du sol et du plafond), des équipements techniques (meublier, appareils de combustion, de climatisation, de chauffage, informatique), des produits d'entretien, de soins corporels, de bricolage et de désodorisation, etc. On recherchera des tâches d'humidité, des dégradations des revêtements et la présence de moisissures et on vérifiera l'efficacité du renouvellement de l'air des locaux (ouvrants, système de ventilation naturelle ou mécanique). Il convient également d'identifier de potentielles sources extérieures de proximité, comme une tour aéroréfrigérante, un parc de stationnement, une activité industrielle ou artisanale, voire un bâtiment construit sur un site potentiellement pollué.

À partir des informations recueillies au cours de l'enquête environnementale et de l'avis médical, on définit une stratégie de mesure d'agents physiques, chimiques ou microbiologiques dans l'air, les matériaux ou les surfaces. Une référence extérieure et/ou un local témoin à proximité des locaux incriminés peuvent être utiles pour servir de points de comparaison.

¹³ Norme PR NF X 43-406 : Décembre 2018. Qualité de l'air – Stratégie d'enquête environnementale suite à signalement. Bâtiment à usage d'habitation, d'enseignement et de bureaux

Pour exemple, les paramètres suivants seront mesurés en fonction des sources de pollution suspectées :

Monoxyde de carbone	Dysfonctionnement des appareils de chauffage et de production d'eau chaude, fumée de tabac ; pollution urbaine extérieure dont trafic automobile de proximité
Composés organiques volatils	Produits de construction ou de décoration (produits dérivés du bois, traitement du bois, revêtements de sol, de mur et de plafond, produits de pose primaires, ragréages et colles, peintures, vernis), ameublement, produits d'entretien, nettoyage à sec, fumée de tabac et e-cigarette ; pollution urbaine extérieure dont trafic automobile de proximité (carburants, station-service, parcs de stationnement), proximité d'industries et d'incinérateurs, pollution éventuelle du sol selon historique du site, asphalte ou bitume, incendies
Benzène	Fumée de tabac, combustion bougies parfumées et encens, chauffage par combustion ; carburants (proximité d'une station-service, d'un parc de stationnement)
Formaldéhyde	Tabagisme et e-cigarette, bois brut et panneaux dérivés du bois avec liant à base de formol (panneaux de particules, de fibres, OSB, etc.), peintures à solvant, matériaux intégrant du formaldéhyde dans leur composition sans effet barrière à l'émission, produits d'entretien et de traitement (phytosanitaire ou curatif contre des nuisibles, combustion encens et bougies parfumées, fumée de tabac
Ozone	Imprimantes laser, photocopieurs, purificateurs d'air avec champ électrique
Dioxyde d'azote	Combustions diverses dont combustion gaz, mauvaise étanchéité des conduits d'évacuation des fumées ; pollution urbaine dont trafic automobile, prise d'air à proximité du trafic automobile, d'un parc de stationnement ou d'un garage
Particules	Réseaux du système aéraulique encrassés/dégradés, combustion, fumée de tabac ; proximité d'un chantier, pollution urbaine extérieure dont trafic automobile, proximité d'industries, air extérieur pollué (dont pollens)
Fibres minérales artificielles	Laines de verre, de roche, de laitier
Radon	Matériaux de construction ; sol dans zones à potentiel radon (fissures, porosité, joints, passage de canalisation)
Flore fongique aéroportée	Indicateur de la qualité de filtration de l'air par les installations de traitement d'air, source intérieure d'humidité (dégâts des eaux, infiltrations condensations) ou de développement de moisissures
Flore bactérienne aéroportée	Indicateur environnemental de l'efficacité du renouvellement d'air, de la propreté des locaux et des installations de ventilation/climatisation
Allergènes d'acariens (pour des patients allergiques)	Literie, sommier tapissier, revêtements textiles de sol et de murs, rideaux, canapés, jouets en peluche
Legionella pneumophila	Réseaux intérieurs de distribution d'eau, aéroréfrigérants



Capteur de mesure en continu de certaines familles de polluants de l'air intérieur

On procède également à des mesures systématiques de la température et de l'humidité, ainsi que du dioxyde de carbone :

- Les mesures de la température et de l'humidité relative sur une durée d'au moins 24 heures (8 jours si possible) donnent des informations sur les conditions ambiantes des environnements étudiés. Ces paramètres permettent de témoigner des conditions de confort du bâtiment pour les occupants, mais aussi des conditions d'émissions chimiques résultant des divers matériaux et produits présents au sein du bâtiment ;
- La mesure du dioxyde de carbone donne des indications sur le renouvellement de l'air des locaux. Elle permet de mettre en évidence, selon les périodes d'occupation et de non-occupation du local, les fluctuations nyctémérales¹⁴ ainsi que les variations existantes entre la semaine et le week-end.

Pour interpréter les résultats des mesures, il est utile de s'appuyer sur des valeurs de référence. Le choix de la valeur de référence pour une substance donnée devra être effectué en prenant en compte plusieurs facteurs : la typologie du milieu dans lequel les mesures ont été conduites, la durée d'exposition des personnes concernées par le signalment (s'agit-il d'une exposition aiguë de courte durée ou d'une exposition continue, chronique, de long terme ?) et la durée de prélèvement des mesures.

Dans un contexte où la finalité des investigations a pour objectif la préservation de la santé des occupants, le choix des valeurs de référence pour l'environnement étudié se fait en priorité de la manière suivante : 1/valeurs réglementaires, lorsqu'elles sont définies ; 2/valeurs repères d'aide à la gestion (VRAI) proposées par le Haut Conseil de la santé publique ; sinon 3/valeurs guides d'air intérieur de l'Anses (VGAi) ou valeurs guides de l'OMS ou valeurs toxicologiques de référence (VTR). Pour les substances

ne disposant pas de ces valeurs de référence, des valeurs à visée informative issues d'études représentatives de l'environnement étudié peuvent être utilisées.

À terme, l'enquête doit faire état de propositions d'actions.

LES LEVIERS D' ACTIONS DE PRÉVENTION ET DISPOSITIFS DE REMÉDIATION

Face aux enjeux sanitaires mais aussi environnementaux et économiques qu'elle représente, la maîtrise de la qualité de l'air intérieur est devenue un sujet de prévention majeur pour les acteurs de la construction, de la rénovation et de l'exploitation du bâtiment.

Différents leviers d'actions de prévention et dispositifs de remédiation ont vu le jour pour répondre à ces enjeux.

1. BÂTIMENT NEUF OU RÉNOVÉ : LES TRAVAUX DE L'ALLIANCE HQE GBC FRANCE

L'Alliance HQE GBC France¹⁵ a publié en 2013 un document portant sur les règles d'application pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur à la réception d'un bâtiment neuf ou rénové (c'est-à-dire au moment du transfert de propriété au maître d'ouvrage, avant que les occupants n'intègrent le bâtiment)¹⁶. Le guide pratique¹⁷, publié en juin 2017, présente les cinq étapes clefs pour intégrer, réaliser et valoriser des mesures de qualité de l'air intérieur à réception : au moment du programme, de la conception du bâtiment, du dossier de consultation des entreprises, de la réalisation du bâtiment et de sa livraison.

Plusieurs autres travaux se sont concentrés sur la phase chantier, maillon sensible de la chaîne de construction et de rénovation d'un bâtiment.

Dans le contexte d'une surveillance régulière de la qualité de l'air intérieur des bâtiments durant leur phase de vie, l'Alliance HQE GBC France a proposé en 2018 dans un document méthodologique des règles d'application pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment en exploitation¹⁸. Ce document s'inscrit dans l'engagement de l'association pour la qualité de vie du cadre de référence du bâtiment durable. Les paramètres mesurés, de nature physique, chimique et microbiologique, sont associés à des valeurs de référence permettant de détecter d'éventuels dysfonctionnements techniques du bâtiment en exploitation.

Le protocole de base à réception ou les paramètres prioritaires en exploitation peuvent être complétés par d'autres paramètres, si l'enquête préalable aux prélèvements révèle d'autres

¹⁵ L'Alliance HQE – GBC est l'alliance des professionnels pour un cadre de vie durable. Elle réunit syndicats, fédérations professionnels, sociétés, collectivités et professionnels à titre individuel des secteurs du bâtiment, de l'aménagement et de l'infrastructure.

¹⁶ Alliance HQE-GBC. Protocole HQE PERFORMANCE : Règles d'application pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment neuf ou rénové à réception, 25 pages. Version de Juin 2015

¹⁷ Alliance HQE-GBC France. Guide pratique « Mesurer la qualité de l'air intérieur des bâtiments neufs ou rénovés : 5 étapes clés pour intégrer, réaliser et valoriser des mesures à réception, 36 pages. Juin 2017

¹⁸ Alliance HQE-GBC France. Le bâtiment durable pour tous. Règles d'application pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment en exploitation, 29 pages. 2018

¹⁴ Variations selon le jour / la nuit sur une durée de 24h

sources potentielles de pollution : problèmes d'humidité, site potentiellement pollué, évolution de l'environnement extérieur (par exemple lors de nouvelles constructions de grandes hauteurs ou de changement de flux de circulation automobile), etc.

2. LES CAPTEURS DE MESURE EN CONTINU

On assiste ces dernières années au développement de capteurs de mesure en continu de certaines familles de polluants (particules et composés organiques volatils, dont le formaldéhyde, parfois dioxyde d'azote), du dioxyde de carbone, de la température et de l'humidité relative. Ce développement permet d'envisager trois pistes importantes de progrès :

- Améliorer l'étude de la dynamique des concentrations ;
- Mieux connaître l'exposition des occupants aux différents polluants ;
- Évaluer les activités émettrices et/ou les pratiques d'aération et/ou le fonctionnement du système de ventilation.

Les informations obtenues peuvent permettre la détection d'un événement de pollution (variation significative de la concentration d'un paramètre, soit de manière prolongée - 1 à 2 heures -, soit de manière répétitive chronique, mais transitoire) et/ou de suivre l'évolution de ses concentrations dans le temps (notion de tendance), en lien avec une activité émettrice et/ou avec le renouvellement de l'air des locaux (aération et/ou ventilation).

Il faut cependant rappeler que l'information transmise par les capteurs comporte des limites : les capteurs fournissent des mesures dites « indicatives », voire une « estimation objective » de la qualité de l'air intérieur. L'utilisation des capteurs pour le pilotage de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment ou pour la sensibilisation des occupants ne peut ainsi être un outil de mesure isolé ; il doit être associé à des informations techniques sur les installations de ventilation, sur l'occupation des locaux étudiés et sur les activités des occupants durant la période des mesures considérée¹⁹. Le nombre considérable de données accumulées au cours du temps ne peut s'interpréter qu'au regard de ces informations pour prendre des décisions utiles et efficaces pour les occupants.

3. LA VENTILATION : UN MAILLON À RENFORCER

L'importance d'un renouvellement d'air des locaux adapté à l'occupation doit être soulignée : un système de ventilation performant et bien entretenu apporte un air neuf et pourvoit aux besoins d'oxygène des occupants, fournit aux appareils à combustion l'oxygène nécessaire pour leur bon fonctionnement, régule l'hygrométrie des locaux et évite le développement de micro-organismes indésirables et de nuisibles (moisissures, acariens, blattes), diminue la transmission d'agents infectieux, évacue les odeurs et les polluants physiques et chimiques

qui s'accumulent, limite l'exposition aux polluants du sol (radon, substances chimiques volatiles) et enfin améliore les performances humaines.

Les retours d'expérience montrent certaines défaillances lors de la conception, de la réalisation et/ou de l'exploitation du système de ventilation, à l'origine de dégradations de la qualité de l'air intérieur et d'un excès d'humidité, source de développement de moisissures. Lors de la phase de conception d'un bâtiment neuf ou rénové, il faut prendre en compte l'impact de la qualité de l'environnement extérieur et l'adaptation de la ventilation aux occupants et à leurs activités. L'expertise d'un spécialiste

en ventilation, un ventiliste, est utile lors de la conception et de la réalisation du système de ventilation. A la phase de réception du bâtiment, la vérification de la ventilation permet de s'assurer de la bonne réalisation des installations. Enfin, en cours d'exploitation du bâtiment, l'assurance de la maîtrise des débits de ventilation est un gage d'efficacité du renouvellement de l'air des locaux.

Les retours d'expérience montrent certaines défaillances lors de la conception, de la réalisation et/ou de l'exploitation du système de ventilation, à l'origine de dégradations de la qualité de l'air intérieur

Les débits de ventilation réglementaires, définis dans les années 1980 (par arrêtés pour les logements, par le règlement sanitaire départemental type pour les établissements recevant du public ou par le Code du travail pour les immeubles de bureaux), mériteraient d'être discutés au regard des attentes de confort des occupants et de la qualité de l'air dans les bâtiments.

4. LES SYSTÈMES D'ÉPURATION DE L'AIR INTÉRIEUR

Ces dernières années, des solutions techniques d'épuration d'air ont été mises sur le marché. Il s'agit soit d'appareils de purification d'air, dont les technologies se fondent sur la filtration ou sur la destruction des polluants de l'air intérieur (photocatalyse, ionisation de l'air...), soit de matériaux fonctionnalisés, fixant et neutralisant les polluants, comme le formaldéhyde, ou agissant par photocatalyse.

Des précautions doivent être prises vis-à-vis de certaines technologies : l'agence nationale de sécurité sanitaire recommande ainsi que des essais d'efficacité et d'innocuité (émission de sous-produits issus de la dégradation incomplète de polluants) soient réalisés en conditions réelles afin d'informer la population, et notamment les patients asthmatiques, des risques potentiels d'une dégradation de la qualité de l'air intérieur lors de l'utilisation de certains dispositifs d'épuration²⁰. Les sujets asthmatiques, notamment, doivent être mis en garde sur une possible aggravation de leur pathologie lors de la mise en œuvre de tels dispositifs, en particulier les dispositifs utilisant des huiles essentielles et les dispositifs pouvant générer de l'ozone.

Toutes les données médicales, techniques et métrologiques issues de ces dispositifs mériteraient d'être rassemblées dans une base de données nationale pour apporter une aide aux professionnels de santé et aux acteurs du bâtiment.

¹⁹ Alliance HQE GBC France. Note de cadrage. Place des capteurs de mesure en continu de la qualité de l'air intérieur lors de la réception ou l'exploitation d'un bâtiment.

²⁰ Agence de sécurité sanitaire – Alimentation, Environnement, Travail (2017) Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes.

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE POUR UNE MEILLEURE QUALITÉ DE L'AIR : UN ENJEU DE SANTÉ PUBLIQUE

Maria P. Neira

Directrice du Département de la santé publique, de l'environnement et des déterminants sociaux de la santé (PHE) de l'Organisation Mondiale de la Santé



Femme cuisinant au bois à l'intérieur d'un foyer

Dr Maria P. Neira, de nationalité espagnole, est médecin de formation et spécialisée en endocrinologie, maladies métaboliques et en santé publique. Elle a commencé sa carrière auprès de réfugiés au Salvador et au Honduras pour Médecins Sans Frontières. Elle a ensuite travaillé en Afrique, notamment pour le PNUD¹ au Rwanda. De 1993 à 1998, elle devient la coordonnatrice du Groupe de Travail mondial sur la lutte contre le Choléra, puis directrice du département Contrôle et Prévention (1999-2002) à l'OMS. Entre 2002 et 2005, elle préside l'Agence espagnole de Sécurité alimentaire et est nommée Vice-Ministre de la Santé et de la Consommation en Espagne. Elle est depuis 2005 directrice du Département de la Santé Publique, de l'Environnement et des Déterminants sociaux de la santé (PHE) de l'OMS, orientant les politiques publiques de l'organisation en matière de santé environnementale. Dr Maria P. Neira a obtenu la Médaille de l'Ordre national du Mérite du gouvernement français et le prix « Femme extraordinaire » de S.M. la Reine Letizia d'Espagne. En 2019, elle a été nommée parmi les 100 personnes les plus influentes sur les politiques en matière de santé et de changements climatiques.

Institution spécialisée de l'ONU et organe référent de la santé publique dans le monde, l'OMS place les enjeux de qualité de l'air intérieur au cœur de sa mission et de son action. Responsable de plus de 3,3 millions de morts par an, la pollution de l'air domestique est particulièrement marquée dans les régions à revenus faibles ou intermédiaires, où les foyers utilisent souvent des sources d'énergie très polluantes pour se chauffer ou cuisiner. On estime ainsi que près de la moitié de la population mondiale fait cuire ses aliments et chauffe son logement avec des sources d'énergies dont la combustion est toxique pour l'être humain et son environnement. La pollution de l'air dans les foyers due aux particules fines de suie est très nocive pour les voies respiratoires et expose particulièrement les femmes et les enfants. La pollution de l'air intérieur est notamment responsable de maladies graves telle que la pneumonie ou la cardiopathie. De nombreux obstacles économiques et politiques empêchent la réalisation de la transition énergétique dans ces régions. L'ouverture du dialogue et de la coopération entre décideurs politiques et acteurs du domaine de la santé publique est indispensable pour sensibiliser l'opinion publique aux liens existants entre qualité de l'air et changement climatique, et pour mener des politiques de santé publiques qui privilégient l'anticipation et la prévention de la pollution plutôt que son traitement. Il est également essentiel de souligner le besoin de coopération entre les acteurs de la santé et les secteurs économiques particulièrement émetteurs de pollution, afin de promouvoir des changements concrets en matière de santé publique.

¹ Programme des Nations Unies pour le Développement

Quel est le rôle de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) au regard des enjeux de la qualité de l'air intérieur, en particulier domestique ?

Maria P. Neira : Institution spécialisée de l'ONU et organe référent de la santé publique dans le monde, l'OMS place les enjeux de qualité de l'air intérieur au cœur de sa mission et de son action. D'un point de vue conceptuel, l'OMS distingue deux notions en matière de qualité de l'air intérieur : d'un côté, la notion de pollution de l'air domestique, qui fait référence à la pollution due aux combustibles domestiques, et de l'autre, la notion plus large de pollution de l'air intérieur, qui couvre la pollution de l'air domestique mais aussi d'autres sources de pollution telles que le plomb, l'amiante, le radon, les moisissures, etc.

L'OMS renforce les capacités nationales et régionales de lutte contre la pollution de l'air intérieur en mettant à disposition des outils pour prévenir et anticiper cette pollution, et en diffusant des informations et de la connaissance sur les thématiques de l'énergie domestique et de la santé publique.

L'OMS a notamment publié des lignes directrices sur la qualité de l'air domestique visant à offrir des conseils sur la façon d'en réduire les effets sanitaires. Ces lignes directrices proposent une assistance technique pour conduire des interventions et des actions d'évaluation en matière d'énergie domestique, et donnent des indications sur les moyens existants pour favoriser une adoption rapide et une utilisation durable, dans les ménages, de technologies énergétiques et de combustibles à faibles émissions. Pour favoriser la mise en œuvre de ces lignes directrices et des politiques publiques associées, l'OMS a élaboré un ensemble d'outils appelé CHEST (*Clean Household Energy Solutions Toolkit*²). Un guide sur les niveaux acceptables et recommandés des différentes catégories de polluants intérieurs (par jour et par année) vient renforcer ce panel d'outils.

Au-delà de ces actions, l'OMS se positionne en chef de file des questions de santé, d'énergie, et de climat. L'organisation cherche à sensibiliser les gouvernements, les agences de coopération et le grand public sur l'importance de recourir à des énergies domestiques moins polluantes et sur les conséquences de la pollution de l'air intérieur sur la santé des individus, en particulier les femmes et les enfants. Pour l'OMS, l'un des enjeux majeurs consiste à inciter les États à effectuer leur transition énergétique. Elle mène pour ce faire des actions de plaidoyer : en octobre 2018, l'OMS a par exemple organisé à Genève, en collaboration avec ONU-Environnement, l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), la Coalition pour le climat et la qualité de l'air en vue de réduire les polluants atmosphériques à

courte durée de vie (CCAC) et la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CCE-ONU), la première conférence mondiale dédiée à la pollution de l'air et à la santé traitant des sujets suivants : améliorer la qualité de l'air, combattre le changement climatique et sauver des vies. Les plaidoyers de l'organisation auprès des grandes instances et forums internationaux sont repris et diffusés par ses partenaires (tels que la Coalition pour le climat et la qualité de l'air). Le sujet commence ainsi à prendre de l'ampleur : de plus en plus de conférences internationales, de groupes de travail internationaux et d'alliances se créent autour de l'enjeu de la qualité de l'air. On peut notamment citer l'Assemblée mondiale de la Santé³, la plateforme mondiale sur la qualité de l'air et la santé⁴, etc.

Quelles sont les zones les plus exposées ou les plus vulnérables face à la pollution de l'air intérieur ?

En 2016, 3,8 millions de personnes sont décédées à cause de la pollution de l'air intérieur. Au sein des habitations insuffisamment ventilées, la teneur en particules fines dans la fumée domestique peut atteindre une concentration 100 fois supérieure aux niveaux acceptables

M. P. N. : En Afrique et en Asie, de nombreux pays sont confrontés à la problématique de la qualité de l'air intérieur, pour des raisons principalement économiques. Il s'agit pour la plupart de pays à revenus faibles ou intermédiaires, où les ménages sont obligés de se chauffer ou de cuisiner en utilisant une source d'énergie très polluante.

Près de la moitié de la population mondiale, soit 3 milliards de personnes (principalement en zones rurales), n'a toujours pas accès à des combustibles et des technologies propres pour cuisiner, se chauffer et s'éclairer ; et recourt donc au bois, aux résidus agricoles, aux déjections animales, au charbon et au charbon de bois, utilise du pétrole dans des foyers ouverts, ou est doté d'installations de cuisine peu efficaces. Ces combustibles et méthodes de cuisson créent un niveau de pollution de l'air particulièrement élevé dans les logements et produisent une multitude de polluants nocifs pour la santé, notamment des fines particules de suie qui pénètrent dans les poumons en profondeur. La teneur en particules fines dans la fumée domestique peut atteindre une concentration 100 fois supérieure aux niveaux acceptables. Les femmes et les jeunes enfants, passant le plus de temps dans les foyers, sont particulièrement exposés.

Quelles sont les conséquences de ces pratiques sur la santé ?

M. P. N. : En 2016, 3,8 millions de personnes sont décédées à cause de la pollution de l'air intérieur. Les maladies dont il est question sont notamment la pneumonie, les cardiopathies ischémiques, les bronchopneumopathies chroniques obstructives, les AVC

2 « Boîte à outils pour des solutions d'énergie domestique propre »

3 <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

4 <https://www.who.int/airpollution/global-platform/en/>



L'accès à des énergies non polluantes pour cuisiner et se chauffer est un véritable enjeu pour la moitié de la population mondiale

et les cancers du poumon. De façon plus générale, les matières particulaires fines et autres polluants présents dans les fumées domestiques provoquent l'inflammation des voies respiratoires et des poumons, ce qui détériore la réponse immunitaire et réduit le pouvoir oxyphorique du sang. Certaines données⁵ prouvent également l'existence de liens entre la pollution de l'air à l'intérieur des logements et des affections très variées telles que la tuberculose, la cataracte, les cancers nasopharyngé et laryngé. La pollution de l'air intérieur peut aussi avoir des conséquences telles qu'un faible poids de naissance pour les nourrissons.

Comment positionneriez-vous la problématique de la qualité de l'air par rapport aux autres enjeux de santé publique (alimentation, sédentarité, etc.) ?

M. P. N. : Il est toujours délicat de comparer des causes de décès en matière de santé publique. Aucun décès ne doit être sous-estimé. En revanche, il est important de rappeler que la pollution de l'air tue plus que la malaria, le VIH et la tuberculose réunis. 7 millions

de mort chaque année (pollution de l'air intérieur et extérieur), c'est presque autant que le tabac. Et le plus effrayant, c'est que ces décès sont d'origines anthropiques : nous, humains, sommes la propre cause de la détérioration de la qualité de l'air que nous respirons. Il est urgent d'agir.

À quels obstacles économiques ou législatifs les pays en développement sont-ils particulièrement exposés ? Quels sont les leviers qui permettent de dépasser ces obstacles ?

M. P. N. : Les obstacles sont doubles : économiques et politiques. Économiques, parce que l'électricité et l'énergie de combustion propre (telle que le gaz de pétrole liquéfié, le biogaz, le gaz naturel exemple), sont chères. Politiques, parce que la législation dans certains pays à revenus faibles ou intermédiaires n'impose pas que les centres ruraux soient électrifiés. Il s'agit là d'engager la volonté des gouvernements à prendre des décisions politiques pertinentes, à investir dans des sources d'énergie non polluantes et à déployer des réseaux électriques

Les obstacles [économiques et politiques] ne pourront être relevés que lorsque les gouvernements auront reconnu l'enjeu de santé majeur que représente le niveau de qualité de l'air intérieur d'un pays

⁵ https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/

durables au sein de zones rurales ou isolées. Toutefois, ces obstacles ne pourront être levés que lorsque les gouvernements auront reconnu l'enjeu de santé publique majeur que représente la qualité de l'air intérieur et lorsque les conséquences sanitaires liées à certaines pratiques (notamment pour cuisiner ou se chauffer, tant dans les pays en développement que dans les pays industrialisés) seront prises en considération.

C'est notamment pourquoi il est nécessaire de créer des opportunités de dialogue, à l'aide de programmes de coopération tel que le Programme paneuropéen pour les transports, la santé et l'environnement⁶ coparrainé par l'OMS. Un tel cadre permet la conception d'un modèle de coopération régionale multisectorielle entre États Membres visant à limiter la pollution de l'air et d'autres facteurs de risque sanitaires dans le secteur des transports, ainsi que le développement d'outils permettant d'évaluer les bienfaits de telles mesures pour la santé. La Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD)⁷ est un autre exemple de cadre international dans lequel les Parties contractantes doivent engager des politiques et des stratégies de diminution des rejets de polluants atmosphériques. La Convention reconnaît notamment un besoin de coopération et de transparence dans la communication entre États.

Cet enjeu de sensibilisation s'applique également aux pays industrialisés. À titre d'exemple, bien que les Suédois aient une forte conscience des enjeux environnementaux et climatiques, leur culture et leurs traditions les incitent à faire toujours autant de feux de cheminée, alors que la fumée est très toxique et polluante. L'enjeu porte principalement sur un nécessaire changement de comportement social. Au Royaume-Uni, le dernier plan de lutte contre la pollution de l'air s'attaque à la problématique en désignant les feux de cheminée comme d'importantes sources de pollution de l'air.

Il est désormais crucial que les citoyens entendent et comprennent que lutter contre le changement climatique, c'est promouvoir une meilleure santé publique

Que pensez-vous des nouvelles technologies permettant de mesurer voire de traiter la qualité de l'air intérieur ?

M. P. N. : Pour nous, la solution ne réside pas dans la remédiation mais plutôt dans la prévention, en évitant que l'air ne soit pollué : il ne faut pas seulement traiter les symptômes mais identifier ce qui est à l'origine de la pollution et de la dégradation de la qualité de l'air (transports, combustibles, production industrielle, incinération des déchets etc.), et lutter contre. Il ne faut pas justifier ce qui est injustifiable.

Les nouvelles technologies développées dans le cadre du traitement de la qualité de l'air (tels que les purificateurs d'air intérieur) peuvent avoir un rôle en matière de prévention en réduisant les concentrations de certains polluants, notamment pour les personnes les plus vulnérables. Mais les résultats d'éventuels effets bénéfiques sur la santé sont encore incomplets.

Un autre levier porte sur les technologies de mesure de la qualité de l'air (tels que les capteurs). Ces technologies permettent de sensibiliser les individus et de faire prendre conscience des enjeux liés à la qualité de l'air intérieur. Ce ne sont pas pour autant des solutions de réduction des pollutions en tant que tel.

Montrer le lien entre qualité de l'air et changement climatique, est-ce un outil de sensibilisation ?

M. P. N. : Le lien entre changement climatique et qualité de l'air est extrêmement important. Le noir de carbone (particules de suie) et le méthane émis par les foyers de cuisson inefficaces sont par exemple de puissants polluants qui contribuent au réchauffement climatique. Il est désormais crucial que les citoyens entendent et comprennent que lutter contre le changement climatique, c'est promouvoir une meilleure santé publique. Selon nos études, les causes de ces deux enjeux sont liées à 70 %, elles se chevauchent. C'est une guerre pour la santé qu'il faut mener. Outre la dégradation de la biodiversité, la fonte des glaces, etc., la qualité de l'air est un enjeu mondial de santé publique. Le dernier grand rassemblement international à New York dans le cadre du *Climate Action Summit* le 23 Septembre 2019 a été l'occasion pour l'OMS de sensibiliser l'opinion publique au lien existant entre qualité de l'air et changement climatique, et de travailler à une feuille de route commune pour l'ensemble des pays sur ce sujet.

⁶ <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/activites-humaines/article/programme-paneuropeen-sur-les-transport-la-sante-et-l-environnement>

⁷ Convention internationale ouverte sous l'égide de l'Organisation des Nations unies le 17 novembre 1979. Parmi les membres signataires : des États membres de la Commission économique pour l'Europe (CEE-ONU), des États jouissant du statut consultatif auprès de cette Commission et des organisations d'intégration économique régionale ayant compétence pour négocier, conclure et appliquer des accords internationaux dans les matières couvertes par la présente Convention, à l'Office des Nations unies à Genève.

L'OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR : un outil unique pour comprendre la pollution de l'air des lieux de vie

Corinne Mandin

Responsable de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) au sein de la Direction Santé Confort du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, France)



Les désodorisants à combustion constituent une pollution de l'air intérieur - ©OQAI-CSTB

Corinne Mandin est responsable de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) au sein de la Direction Santé Confort du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, France). Ingénieur chimiste de formation et titulaire d'un doctorat en biologie et sciences de la santé, elle travaille sur les expositions humaines aux substances chimiques, en particulier dans les bâtiments.

L'OQAI a été créé en 2001 pour documenter la qualité de l'air et le confort dans les lieux de vie. Ses travaux sont financés par les ministères en charge du Logement, de l'Environnement et de la Santé, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses).

Le CSTB, opérateur scientifique et technique de l'OQAI, a pour mission de garantir la qualité et la sécurité des bâtiments. Il accompagne les acteurs dans la transformation du bâtiment en lien avec les transitions environnementale, énergétique et numérique. Il exerce cinq activités clés : la recherche et expertise, l'évaluation, la certification, les essais et la diffusion des connaissances. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans le quartier et la ville.

Depuis une dizaine d'années, la qualité de l'air intérieur est devenue une composante majeure de la santé environnementale. En France, des campagnes nationales de mesure des polluants de l'air intérieur sont menées par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), dans les logements, les écoles, les espaces de bureaux et les établissements sanitaires et médico-sociaux. Après une présentation des polluants concernés et de leurs effets sur la santé, cet article résume les principaux résultats des campagnes nationales de l'OQAI dans trois types d'environnements : logements, salles de classe et bureaux. Un focus plus spécifique est réalisé sur les relations entre qualité de l'air intérieur et performances énergétiques. En effet, une amélioration de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment pour réduire les déperditions d'énergie peut conduire à une réduction du renouvellement d'air et, corollairement, à une dégradation de la qualité de l'air intérieur. Si des travaux de recherche restent nécessaires pour améliorer les connaissances sur les substances présentes dans l'air des bâtiments et sur leurs effets sur la santé, il existe d'ores et déjà des bonnes pratiques et des outils à mettre en place pour améliorer la qualité de l'air intérieur de nos lieux de vie.

INTRODUCTION

L'enjeu sanitaire que représente la qualité de l'air intérieur n'est aujourd'hui plus à démontrer. En 2014, l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) et l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) ont chiffré, pour une année, à environ 28 000 le nombre de nouveaux cas de maladies et à plus de 20 000 le nombre des décès liés à six polluants de l'air intérieur en France, ce qui représente un coût d'environ 19 milliards d'euros. Les modes de vie contemporains conduisent en effet la population à passer la majorité de son temps dans des environnements clos, où un large nombre de polluants peuvent être présents.

Pour répondre au besoin d'approfondissement des connaissances et mieux orienter les politiques publiques et les solutions d'amélioration, l'OQAI mène des recherches sur de nouveaux polluants et explore de nouvelles problématiques.

LES POLLUANTS À L'ORIGINE DE LA DÉGRADATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR ET LEURS EFFETS SUR LA SANTÉ

Les sources de pollution de l'air dans les bâtiments sont très nombreuses. Classiquement, les polluants intérieurs sont catégorisés selon leur nature : polluants chimiques (composés organiques volatils (COV) ou semi-volatils, gaz inorganiques), biologiques (virus, bactéries, moisissures, allergènes d'animaux domestiques, allergènes d'acariens) ou physiques (particules, fibres d'amiante, fibres minérales artificielles, champs électromagnétiques). La pollution intérieure peut également être décrite selon les trois types de sources généralement considérées : i) pollution extérieure (air ou sol dans le cas du radon ou d'un sol pollué par une activité industrielle passée ou actuelle), ii) constituants du bâtiment (matériaux de construction et revêtements – sol, murs, plafond) et équipements, et iii) occupants eux-mêmes (bioeffluents, tabagisme, nettoyage, bricolage, hygiène corporelle, etc.).

La contribution respective de chacune de ces sources aux concentrations intérieures est difficile à déterminer, non seulement du fait des spécificités de chaque espace et des habitudes de ses occupants, mais aussi en raison de la variabilité temporelle des concentrations intérieures et des phénomènes de réactivité chimique conduisant à la formation de polluants secondaires. Par exemple, les terpènes, substances chimiques utilisées notamment dans les produits d'entretien et désodorisants d'intérieur, peuvent réagir avec l'ozone en provenance de l'extérieur et conduire à la formation de formaldéhyde et de particules ultrafines. La température et l'humidité relative jouent également un rôle en favorisant les émissions des matériaux dans l'air intérieur.

La pollution de l'air intérieur évolue continuellement dans le temps. De nouveaux usages, comme le vapotage ou l'impression 3D, génèrent de nouvelles pollutions. Parallèlement, certaines substances pourtant aujourd'hui interdites à la vente peuvent être encore présentes dans les bâtiments. C'est le cas, par exemple, des polychlorobiphényles (PCB), utilisés dans les joints d'étanchéité dans les années 1970 et fréquemment détectés dans l'air des bâtiments construits à cette époque ; ou encore du lindane, insecticide utilisé pour le traitement des charpentes en bois ou dans les shampoings anti-poux et encore très souvent détecté dans l'air des bâtiments. En vue de la prochaine campagne nationale de mesure de la qualité de l'air intérieur dans les logements français qui démarre en 2020, l'OQAI a mis à jour son inventaire¹ des substances potentiellement présentes dans l'air intérieur. La liste est établie à partir des substances i/ déjà mesurées dans l'air ou dans les poussières déposées au sol, ii/ déjà mesurées en chambre d'essai dans les émissions de matériaux de construction ou produits de consommation, ou encore iii/ rapportées dans la composition de matériaux et produits introduits dans les bâtiments. Un total de 2 741 substances a ainsi été recensé, soit 1 715 nouvelles substances par rapport à la dernière hiérarchisation des polluants de l'air intérieur de l'OQAI (2010)².

Les effets sanitaires des polluants de l'air intérieur sont tout aussi variés que les polluants qui en sont la cause. Ils vont de la simple gêne, liée aux odeurs, à des effets plus graves comme les intoxications mortelles dues au monoxyde de carbone, l'asthme, le cancer, des maladies cardiovasculaires ou des troubles de la reproduction. Une mauvaise qualité de l'air intérieur peut également être associée à des irritations des yeux, du nez et des voies respiratoires, des maux de tête ou des nausées.

Si certaines associations entre substances présentes dans l'air intérieur et effets sur la santé sont bien établies, (comme c'est le cas pour les fibres d'amiante et le mésothéliome, ou bien le radon et le cancer du poumon), les effets d'un grand nombre d'autres polluants ne sont pas clairement identifiés et restent uniquement suspectés. Par ailleurs, les effets sur la santé sont d'autant plus complexes à déterminer étant donné qu'ils sont parfois différés, que les expositions se font à faibles doses, via plusieurs voies incluant l'ingestion de poussières déposées sur les surfaces et le contact cutané, en plus de l'inhalation ; et que ces effets sont possiblement additifs, synergiques ou antagonistes du fait du mélange des substances en présence.

Actuellement, les préoccupations relatives à la pollution intérieure portent sur les perturbateurs endocriniens, les pesticides, notamment au voisinage de cultures, la biocontamination (dispersion des virus dans les bâtiments en cas de pandémie grippale par exemple), ainsi que les nanoparticules. Ces particules, de diamètre inférieur à 100 nm, peuvent être incorporées aux matériaux de construction et produits de consommation courante pour leur conférer des propriétés particulières, par exemple de résistance ou de conservation. Tandis que des études font émerger le caractère préoccupant des particules de cette taille pour la santé respiratoire³, se pose la question de leurs émissions, dans l'air des bâtiments au cours de l'utilisation de ces matériaux et produits, puis lors de la dégradation de ces derniers.

ÉTAT DES LIEUX DES EXPOSITIONS DE LA POPULATION DANS LES BÂTIMENTS

Premier environnement intérieur en termes de temps passé, le logement a fait l'objet de la première campagne nationale de l'OQAI en 2003-2005. Plus d'une centaine de paramètres chimiques, physiques et biologiques ont été mesurés pendant une semaine, dans un échantillon de 567 logements tirés au sort et représentatifs du parc des résidences principales de France métropolitaine. Cette campagne a montré que certains polluants comme le formaldéhyde, les particules, ainsi que certains phtalates et hydrocarbures aromatiques polycycliques étaient systématiquement présents dans les logements. La pollution de l'air des logements n'est cependant pas homogène et différents profils de pollution ont été identifiés. Ainsi, 10 % des logements français sont multipollués : ils présentent simultanément plusieurs polluants chimiques à de très fortes concentrations. En revanche, 40 % des logements sont considérés comme étant faiblement pollués car ils présentent des concentrations inférieures ou égales aux niveaux médians de l'échantillon pour quasiment l'ensemble des polluants recherchés.

1 Inventaire en cours de publication (début 2020)

2 <https://www.oqai.fr/fr/campagnes/la-hierarchisation-des-polluants>

3 Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. World Health Organization, Regional Office for Europe, 2013.



Mesure de la qualité de l'air intérieur chez un particulier - ©OQAI-CSTB

La mise en perspective des concentrations mesurées avec les caractéristiques des bâtiments, leur localisation, leurs occupants et leurs habitudes de vie ont permis d'identifier des facteurs conduisant à une dégradation de la qualité de l'air intérieur. Par exemple, dans les maisons individuelles, la présence d'un garage communicant augmente les concentrations en benzène et toluène dans le reste du logement. Ces substances sont émises par les véhicules (gaz à l'échappement et réservoirs) et les produits de bricolage pouvant être stockés dans le garage. Les activités de cuisson, de soin et d'hygiène (douche, séchage du linge) peuvent contribuer à introduire une forte humidité dans le bâtiment, propice au développement des moisissures. Le comportement vis-à-vis de l'ouverture des fenêtres et l'état des systèmes mécaniques de ventilation jouent également un rôle sur la qualité de l'air intérieur.

Près d'un logement neuf ou récemment rénové sur deux est contaminé par des moisissures, le plus souvent non visibles

Après le logement, l'école est le deuxième lieu de vie fréquenté par les enfants. 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 avoir des répercussions sur la qualité de l'air intérieur et constituent des spécificités propres à ces bâtiments en comparaison des logements. Par ailleurs, l'utilisation de craie, la proximité d'axes de circulation et la forte activité des enfants (donc la remise en suspension des poussières déposées) sont des facteurs qui contribuent à la pollution particulière dans les salles de classe. Toutes ces spécificités ont motivé la conduite d'une campagne nationale de mesure, menée par l'OQAI entre 2013 et 2017, dans un échantillon de 301 écoles maternelles et

élémentaires, tirées au sort et représentatives des écoles de France métropolitaine.

La grande majorité des écoles respectent les valeurs guides réglementaires de qualité de l'air intérieur disponibles pour le formaldéhyde et le benzène⁴, et les valeurs limites nécessitant des investigations complémentaires et l'information du préfet de département ne sont jamais dépassées. Le dioxyde d'azote, marqueur de la pollution atmosphérique extérieure en l'absence de sources de combustion dans les bâtiments scolaires, n'est pas détecté dans un quart des écoles. Cependant, les résultats de cette campagne nationale mettent en avant quatre points d'attention. Tout d'abord, la pollution aux particules fines est omniprésente, avec des concentrations intérieures supérieures à la valeur guide proposée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans 96 % des écoles. Certains polluants, parmi lesquels des phtalates, utilisés comme plastifiants, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, issus de phénomènes de combustion, notamment du trafic routier extérieur, et le lindane sont présents dans l'air de 100 % des salles de classe. La présence de plomb dans des peintures dégradées est observée à des concentrations supérieures à la limite réglementaire de 1 mg/cm² dans 15 % des écoles. Enfin, 40 % des écoles ont au moins une salle de classe dans laquelle le renouvellement d'air n'est pas satisfaisant au regard de l'occupation, avec un indice de confinement égal à 4 ou 5 sur une échelle de 5.

⁴ Décret 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène



Mesure de la qualité de l'air intérieur
au sein d'une salle de classe - ©OQAI-CSTB



Mesure de la qualité de l'air intérieur
sur un lieu de travail - ©OQAI-CSTB

Alors que la surveillance réglementaire de la qualité de l'air intérieur est en place dans les crèches et les écoles, il convient de préparer les prochaines échéances et d'identifier les paramètres pertinents pour la surveillance à mener dans les autres lieux recevant du public. L'OQAI a ainsi été missionné par les pouvoirs publics pour réaliser des mesures dans trois types d'établissements spécifiquement ciblés pour l'échéance de 2023 : les établissements d'hébergement de personnes âgées, les unités de soin de longue durée et les établissements d'accueil d'enfants et d'adultes handicapés. Une centaine de ces établissements tirés au sort sont actuellement étudiés (2019-2020) afin d'obtenir de premières données relatives à la qualité de l'air intérieur et au confort dans ces lieux.

FOCUS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES BÂTIMENTS DE BUREAUX ET RELATIONS AVEC LA PERFORMANCE AU TRAVAIL

Dans les espaces de bureaux, des sources et activités spécifiques, comme la présence d'imprimantes et de photocopieurs et l'entretien régulier des locaux avec des produits pouvant émettre des composés organiques volatils (COV), posent question sur une éventuelle spécificité de la pollution intérieure dans ces bâtiments. Dans ce contexte, et sachant que le temps passé dans ces lieux est important pour une large part de la population active, une campagne nationale de mesure a été menée par l'OQAI de 2013 à 2017. Des mesures de COV et aldéhydes (19 composés recherchés), de particules de diamètre compris entre 10 nm et 1 µm, de température, d'humidité relative et de dioxyde de carbone (CO₂) ont été réalisées dans 129 bâtiments de bureaux, tirés au sort pour les deux tiers et sur une base de volontariat pour le tiers restant. Cinq espaces de travail ont fait l'objet des mesures dans chaque bâtiment.

Les premières exploitations des données montrent des concentrations intérieures globalement faibles pour les substances recherchées. La concentration médiane en formaldéhyde est égale à 14 µg/m³, à savoir inférieure aux médianes des concentrations dans les logements et les écoles. Des concentrations élevées en limonène (> 100 µg/m³) sont mesurées

dans 5 % des bureaux. De même, des concentrations en benzène supérieures à 10 µg/m³ sont ponctuellement observées et sont, dans quasiment toutes les situations, liées à une concentration également élevée dans l'air extérieur, en zones urbaines denses. Certains bureaux (7 %) sont multipollués, avec une présence de tous les composés recherchés en concentrations plus élevées que dans l'ensemble de l'échantillon. Les exploitations se poursuivent pour identifier les facteurs contribuant à une mauvaise qualité de l'air intérieur dans certains espaces de bureaux.

Une qualité de l'air intérieur dégradée dans les espaces de bureaux est associée à une diminution de la performance des travailleurs. De nombreuses études ont été menées en conditions contrôlées. Elles ont démontré 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. Une étude française examinant cette relation en condition réelle a été menée dans le cadre du projet européen OFFICAIR⁵. Ce projet (2011-2014) avait pour objectif l'étude de la qualité de l'air et du confort dans les immeubles de bureaux neufs ou récemment rénovés en Europe. Coordinée en France par l'OQAI, l'étude a montré que si les caractéristiques individuelles restaient les principaux déterminants de la performance au travail, les concentrations intérieures en xylènes et ozone mesurées en période estivale pouvaient avoir une influence⁶. Dans le cadre de ce projet, les occupants des bureaux enquêtés ont été interrogés sur la perception de leur espace de travail. Les principaux motifs d'insatisfaction des 1 190 répondants dans les 21 bâtiments français concernaient le bruit des autres occupants (54 % d'insatisfaits), l'air sec (48 %) et l'air confiné (46 %). S'agissant des symptômes sanitaires attribués au bâtiment, les plus fréquents étaient le mal de tête (31 % des répondants), les yeux secs (27 %), les yeux larmoyants ou irrités

5 Étude citée dans l'article de Fabien Squinazi : Bartzis J. and al. European collaborative project OFFICAIR (2014) "On the reduction of health effects from combined exposure to indoor air pollutants in modern offices".

6 Mandin C, Boerstra A, Le Ponner E, Cattaneo A, Roda C, Fossati S, Carrer P. Qualité de l'air intérieur et confort dans les espaces de bureaux, et relations avec la performance au travail. Volet français du projet OFFICAIR, Partie 2. Environnement, Risques & Santé 2017, 16: 565-574.



Enquête sur les liens entre perception de la qualité de l'air, du confort, et les effets sanitaires ressentis en environnement intérieur ©OQAI-CSTB

(21 %) et la gorge sèche ou irritée (21 %)⁷. La possibilité de pouvoir contrôler l'environnement intérieur (température, éclairage, etc.) est apparue comme favorisant une meilleure perception de celui-ci. De même, l'existence et l'efficacité d'une procédure de gestion des plaintes est associée à une meilleure perception de la qualité de l'air et du confort et à une diminution des effets sanitaires perçus dans le bâtiment et attribués à ce dernier.

LA NÉCESSAIRE CONCILIATION DES ENJEUX SANITAIRES ET ÉNERGÉTIQUES

À l'heure où les enjeux du bâtiment s'inscrivent dans des priorités d'économie d'énergie, l'OQAI porte une attention particulière à la qualité de l'air et au confort des bâtiments neufs et réhabilités. En effet, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments, qui passe notamment par le renforcement de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, ne doit pas se faire au détriment de la qualité de l'air intérieur. Ainsi, l'OQAI a engagé en 2012 un programme⁸ dédié à l'étude de la qualité de l'air intérieur et du confort dans les bâtiments neufs ou récemment rénovés. Les résultats portent à ce jour sur 72 logements et montrent des concentrations inférieures ou équivalentes à celles observées dans les logements français en 2003-2005, à l'exception de trois substances chimiques : l'hexaldéhyde, l' α -pinène et le limonène. Les facteurs associés à ces concentrations intérieures plus élevées n'apparaissent pas liés aux performances énergétiques des bâtiments mais à la présence de bois (ossature, parquet, mobilier et isolant) et aux produits d'entretien⁹. Dans ce même échantillon, un développement fongique actif est présent dans 47 % des logements contre 37 % pour le parc français en 2003-2005, ce qui signifie que près d'un logement neuf ou récemment rénové sur deux est contaminé par des moisissures, le plus souvent non visibles. Dans les bâtiments en construction, la suppression des fuites d'air parasites alors que la ventilation mécanique contrôlée (VMC) n'est pas encore en fonctionnement et que les fenêtres sont maintenues fermées, combinée à la

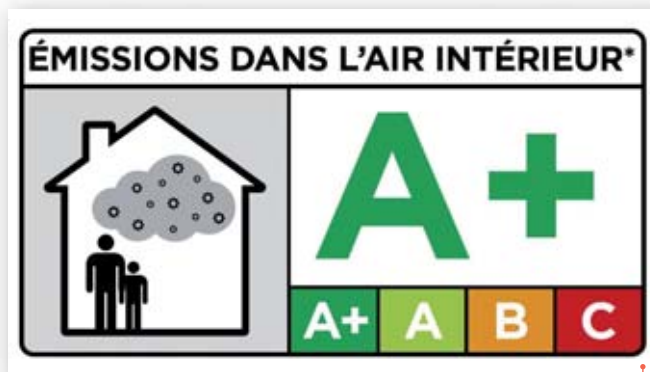
réduction des temps de séchage des matériaux, peut expliquer une forte humidité lorsque le bâtiment est mis hors d'eau-hors d'air¹⁰ ainsi que la présence de moisissures à réception. Dans les bâtiments rénovés, l'absence de prise en compte de la ventilation alors que l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment est renforcée limite l'évacuation de l'humidité générée par les occupants et leurs activités, et favorise ainsi le développement de moisissures.

L'augmentation des concentrations en radon dans les logements rénovés constitue un autre point de vigilance. En France, de vastes campagnes de mesure menées dans des zones géographiques à fort potentiel d'émission de radon par le sol ont montré que les maisons dans lesquelles un changement de fenêtres à des fins d'économie d'énergie avait été effectué présentaient des concentrations en radon statistiquement significativement plus élevées que les maisons sans changement de fenêtres¹¹. De telles observations ont également été notées dans d'autres pays (Suisse, Finlande, Lituanie et États-Unis).

LES BONS GESTES ET LES MOYENS POUR RESPIRER UN AIR INTÉRIEUR DE BONNE QUALITÉ

Si des travaux de recherche restent nécessaires pour améliorer les connaissances sur les substances présentes dans l'air des bâtiments et sur leurs effets sur la santé, des bonnes pratiques à mettre en place et des outils existent d'ores et déjà pour améliorer les situations sans attendre.

L'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe tout d'abord par l'utilisation de produits et de matériaux faiblement émissifs. Depuis le 1^{er} septembre 2013, les produits de construction et de décoration (revêtements de mur, de sol et de plafond, peintures et vernis, matériaux d'isolation, etc.) mis sur le marché français doivent obligatoirement porter une étiquette indiquant leur potentiel émissif en COV. Cet étiquetage est fondé sur les émissions de dix COV et des composés organiques volatils pris dans leur ensemble (indicateur « COV totaux »). Quatre classes indiquent le niveau d'émission des produits et vont de « A+ » (le produit émet très peu ou pas du tout) à « C » (le produit émet beaucoup ou les émissions n'ont pas été évaluées).



Étiquette indiquant la classe d'émission en composés organiques volatils d'un matériau ou produit de construction ou de décoration

7 Mandin C, Boerstra A, Le Ponner E, Roda C, Fossati S, Carrer P, Bluysen P. Perception de la qualité de l'air intérieur, du confort et de la santé dans les espaces de bureaux, et relations avec les caractéristiques techniques des bâtiments. Volet français du projet OFFICAIR, Partie 1. Environnement, Risques & Santé 2017, 16: 553-564.

8 <https://www.oqai.fr/fr/campagnes/fonctionnement-du-programme-oqai-bpe>

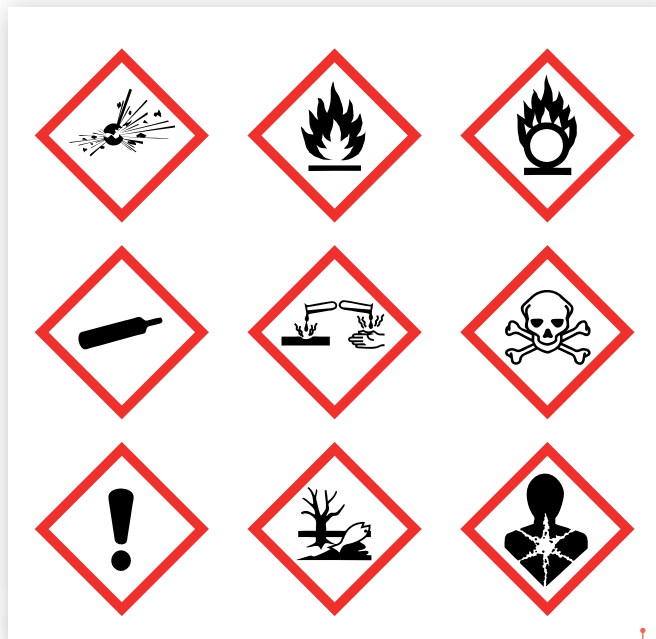
9 Derbez M, Wyart G, Le Ponner E, Ramalho O, Ribéron J, Mandin C. Indoor air quality in energy-efficient dwellings: levels and sources of pollutants. Indoor Air 2018, 28 : 318-338.

10 Pose du toit et des menuiseries (portes et fenêtres)

11 Le Ponner E, Collignan B, Ledunois B, Mandin C. Déterminants des concentrations intérieures en radon dans les logements français. Environnement, Risques & Santé 2019, 18 : 33-40.

À défaut d'étiquetage pour choisir les produits, il convient de respecter les consignes d'utilisation, qui requièrent souvent une aération plus importante des locaux pendant l'usage des produits. Il convient également de ne pas stocker 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 (voir les symboles de danger sur les étiquettes).

L'observation à l'échelle des parcs de bâtiments en situation d'occupation est un outil unique pour élaborer et ajuster les politiques publiques, engager les professionnels et sensibiliser le grand public



Pictogrammes de danger sur les produits chimiques - ©INRS

D'autres actions sont également essentielles pour garantir la qualité de l'air intérieur. Ainsi, l'entretien régulier des équipements du bâtiment et 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 dégâts des eaux, des infiltrations d'eau et des remontées capillaires est aussi essentielle pour limiter la présence d'humidité et le développement des moisissures.

Le deuxième groupe d'actions pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur concerne l'aération et la ventilation. La présence de polluants ne pouvant être complètement évitée, il faut renouveler l'air pour les évacuer. Les systèmes de ventilation doivent être correctement dimensionnés, installés et maintenus. Les entrées d'air ne doivent jamais être obturées. Les prises d'air neuf des systèmes de ventilation mécanique doivent être éloignées de toute source de pollution extérieure (trafic routier ou rejet de parking souterrain si en façade, tour aéro-réfrigérante ou cheminée d'une chaufferie si en toiture). Les filtres doivent être régulièrement nettoyés et changés. Il convient de laisser un espace de 2 cm sous les portes pour permettre la circulation de l'air. Le site Internet <https://www.batiment-ventilation.fr/> rassemble les normes et guides relatifs

à l'évaluation de la ventilation dans les bâtiments résidentiels et tertiaires.

Enfin, l'utilisation d'appareils épurateurs d'air est la dernière solution qui peut être envisagée. Une grande vigilance est de mise lorsque de tels appareils sont introduits dans les bâtiments, soit dans les systèmes de ventilation, soit intégrés aux matériaux ou via des appareils autonomes. L'efficacité de ces systèmes et leur innocuité (non-émission de sous-produits de dégradation) sont à évaluer. Dans une expertise menée en 2017, l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) considère que les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de démontrer l'efficacité et l'innocuité des dispositifs d'épuration de l'air intérieur fonctionnant sur les principes de la catalyse ou photocatalyse, du plasma, de l'ozonation ou de l'ionisation¹². La filtration mécanique traditionnelle des particules au niveau de l'entrée d'air du système de ventilation ou via un appareil autonome est efficace si le dispositif est correctement et régulièrement entretenu.

CONCLUSION

L'observation à l'échelle des parcs de bâtiments en situation d'occupation est un outil unique pour élaborer et ajuster les politiques publiques, engager les professionnels et sensibiliser le grand public. Les connaissances sur les polluants présents dans l'air intérieur ont largement progressé ces dernières années et des avancées majeures ont été réalisées pour réduire les expositions à certaines substances chimiques. Des recherches sont encore nécessaires, et ce d'autant que le bâtiment est en constante évolution et que de nouvelles interrogations sont soulevées, en lien avec de nouveaux usages et de nouveaux produits, le changement climatique ou la réémergence des problématiques d'amiante à l'occasion des programmes de rénovation énergétique des bâtiments. Parallèlement, les acteurs privés se sont saisis de la problématique pour l'intégrer dans l'acte de construire des bâtiments et dans leur exploitation. Le développement croissant de capteurs miniaturisés et connectés de mesure de certains polluants devrait permettre d'assurer un suivi massif de la qualité de l'air dans les bâtiments, et ainsi d'alerter pour agir en cas de pollution. La qualité de l'air intérieur étant devenue un critère de performance des bâtiments, elle se place de plus en plus au cœur des préoccupations et des attentes sociétales en matière de protection de la santé.

Pour plus d'informations :

<http://www.oqai.fr>

L'ouvrage « Qualité d'air intérieur, qualité de vie : 10 ans de recherche pour mieux respirer », publié en 2011 à l'occasion des 10 ans de l'OQAI aux Éditions CSTB.

¹² <https://www.anses.fr/fr/content/%C3%A9purateurs-d%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-une-efficacit%C3%A9-encore-%C3%A0-d%C3%A9montrer>

USAGER DU MÉTRO : CE QUE VOUS DEVEZ SAVOIR SUR LA QUALITÉ DE L'AIR*

Teresa Moreno

Directrice de l'IDAEA (Institute of Environmental Assessment and Water Research), Barcelone

Fulvio Amato,

Chercheur permanent à l'IDAEA, Barcelone

* Article mis à jour à partir d'une publication initiale sur le site *The Conversation*¹



Métro de Tokyo, 2016. Mildiou/Flickr, © BY-SA

Teresa Moreno est la directrice de l'institut de recherche en sciences environnementales espagnol IDAEA (Institute of Environmental Assessment and Water Research). Elle a obtenu en 1999 un doctorat à l'Université de Cardiff (Royaume-Uni) sur la géochimie et la micro-minéralogie des éléments du groupe platine. Elle a travaillé en tant que chercheuse postdoctorale au Royaume-Uni avec des toxicologues sur la caractérisation physique et chimique des particules atmosphériques et leurs effets sur la santé. Elle a coordonné le projet européen IMPROVE LIFE et les projets METRO et BUSAIR sur l'amélioration de la qualité de l'air dans les métros et les bus publics en Espagne.

Fulvio Amato est chercheur permanent à l'IDAEA. Il a obtenu en 2010 un doctorat sur les émissions induites par la circulation hors gaz d'échappement et a travaillé aux Pays-Bas (TNO) en tant que chercheur postdoctoral. Il est également conseiller auprès d'organisations nationales et internationales (OMS, APE, OCDE, CEN, CEE-ONU) sur la qualité de l'air et la santé.

Plus de 120 millions de personnes à travers le monde prennent le métro chaque jour pour se rendre sur leur lieu de travail. Les Nations Unies ayant estimé qu'en 2050, 75 % de la population mondiale vivrait en ville, le nombre d'usagers des métros est appelé à augmenter. Outre le rôle essentiel que jouent les métros dans la mobilité des citoyens, ce mode de transport peut aussi jouer un rôle clé dans la réduction de la pollution de l'air extérieur, en offrant une alternative aux véhicules individuels. Cependant, en réponse à l'intérêt grandissant des scientifiques et du public pour la qualité de l'air et son importance pour la santé humaine, plusieurs études ont révélé des niveaux inacceptables de particules inhalables (PM) dans les réseaux de métro. Le présent article passe en revue certaines de ces études et met leurs résultats en perspective par rapport aux directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) relatives à la concentration de particules fines dans l'air. Les auteurs identifient des facteurs qui contribuent à la pollution de l'air du métro. Ils formulent des recommandations destinées à aider les urbanistes et les usagers à limiter et se préserver de cette pollution.

INTRODUCTION

En 2017, le gouvernement indien annonçait l'ouverture de lignes de métro dans quatre villes majeures du pays. De l'autre côté de l'Himalaya, Shanghai construit sa quinzième ligne, dont l'ouverture est prévue en 2020, ajoutant 38,5 km et 32 stations au plus grand réseau de métro du monde. Quant aux New-Yorkais, ils peuvent enfin profiter de la ligne T, après l'avoir attendue près de 100 ans.

Rien qu'en Europe, on recense plus de 60 villes dans lesquelles le métro est utilisé pour les déplacements quotidiens. A travers le monde, plus de 120 millions de personnes se déplacent en métro. On compte environ 4,8 millions d'usagers par jour à Londres, 5,3 millions à Paris, 6,8 millions à Tokyo, 9,7 millions à Moscou et 10 millions à Pékin.

Pour réduire les émissions atmosphériques en ville, l'utilisation des transports publics, plutôt que des transports individuels. Dans ce contexte, les métros sont une solution idéale.

Pour assurer les trajets dans des villes très peuplées, les métros sont essentiels, et ce toujours davantage à l'avenir : un rapport des Nations Unies publié en 2014 estime en effet que la moitié de la population vit désormais en ville. Les métros peuvent également contribuer à limiter la pollution de l'air extérieur dans les grandes métropoles, en remplaçant les véhicules motorisés. De grandes quantités de particules inhalables (matières en suspension ou matières particulaires, abrégées en PM) et de dioxyde

¹ <https://theconversation.com/commuting-by-subway-what-you-need-to-know-about-air-quality-82859>

d'azote (NO₂), produits entre autres par la circulation routière, le chauffage résidentiel et les émissions industrielles, sont responsables de la baisse de l'espérance de vie des citoyens. Les systèmes de transport public, comme les métros, semblent être une bonne solution pour réduire la pollution atmosphérique dans l'environnement urbain. Cependant, des études menées pour répondre aux préoccupations grandissantes de la communauté scientifique et du public vis-à-vis de la qualité de l'air ont révélé des niveaux inacceptables de matières en suspension dans les réseaux de métro.

En toute logique, étudier la qualité de l'air que nous respirons dans le métro, que ce soit sur les quais ou dans les voitures, est un enjeu essentiel.

UNE QUALITÉ D'AIR INÉGALE

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études pionnières se sont penchées sur la qualité de l'air du métro dans des villes d'Europe, d'Asie et des États-Unis. Si la base de données est encore incomplète, elle s'étoffe peu à peu et présente déjà un intérêt.

Par exemple, en comparant la qualité de l'air sur un même trajet effectué en métro, bus, tramway ou à pied à Barcelone, l'air du métro affiche des niveaux de pollution atmosphérique plus élevés (concentrations de PM_{2,5} (43 µg/m³ : dans la fourchette 37-49 µg/m³) que l'air respiré en tramway ou à pied (29 µg/m³ : dans la fourchette 23-35 µg/m³), mais légèrement inférieurs aux niveaux du bus (45 µg/m³ : dans la fourchette 39-49 µg/m³)². De la même manière, des études réalisées à Hong Kong³, Mexico⁴, Istanbul⁵ et Santiago du Chili⁶ démontrent que l'air du métro est moins pollué que celui respiré par les usagers d'autres transports publics.

Ces différences proviendraient des matériaux utilisés dans les mécanismes de freinage et des différents systèmes d'aération et de climatisation. Toutefois, elles s'expliquent aussi par des décalages entre les protocoles de mesures et le choix des sites de prélèvement.

Dans certains cas, les concentrations de PM_{2,5} sur un quai peuvent dépasser 100 µg/m³ en moyenne quotidienne, ce qui montre la nécessité d'améliorer la qualité de l'air souterrain dans certaines stations. Toutefois, certaines stations de métro peuvent être remarquablement propres : les niveaux de PM_{2,5} sur les quais de la station Collblanc⁷ (26 µg/m³) de la ligne L9S à

Barcelone, par exemple, sont proches des limites européennes pour l'air extérieur. Ce résultat montre qu'il est tout à fait possible de respirer un air relativement pur, même dans l'espace confiné d'un réseau de métro.

DES EFFETS SUR LA SANTÉ

La qualité de l'air à l'intérieur du système ferroviaire souterrain n'est pas encore intégrée à la législation sur la qualité de l'air dans les villes. La réglementation actuelle de la Commission européenne exige que les autorités maintiennent les niveaux ambiants de PM_{2,5} dans l'air extérieur en dessous d'une moyenne annuelle de 25 µg/m³ (2008/50/EC). Les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sont plus ambitieuses : elles préconisent une diminution progressive des niveaux de particules, de 35 µg/m³ jusqu'au niveau idéal de 10 µg/m³. Les particules du métro étant chimiquement différentes de la plupart des particules extérieures, une question évidente se pose : sont-elles plus toxiques que les particules inhalées en ville, notamment celles qui caractérisent l'air pollué par la circulation ? Selon certaines études, les particules du métro sont en effet relativement plus toxiques⁸, tandis que d'autres ne constatent pas de différence entre la bio-réactivité de l'air extérieur et celle de l'air du métro⁹. D'autres, enfin, signalent un potentiel oxydant (PO) plus élevé des PM de la circulation extérieure que de celles du métro¹⁰. Au vu de l'ensemble des études publiées jusqu'à présent, la pollution atmosphérique souterraine à laquelle s'exposent les usagers du métro ne serait pas plus toxique que celle produite par le trafic urbain de surface.

À ce jour, aucune indication épidémiologique claire ne révèle d'effets anormaux sur la santé des employés et les usagers du métro. Les ouvriers du métro de New York¹¹ ont été exposés à cet air sans que l'on ait observé d'effet significatif sur leur santé et il n'a pas été constaté d'augmentation du risque de cancer du poumon chez les conducteurs de métro de Stockholm¹². Toutefois, il faut rester prudent quant à ces conclusions car des niveaux plus élevés de marqueurs de risque de maladies cardiovasculaires ont été constatés chez les employés travaillant sur les quais du métro de Stockholm (où les concentrations de particules étaient les plus élevées) que chez les vendeurs de billets ou les conducteurs de train.

Plusieurs études ont révélé des niveaux inacceptables de particules inhalables (PM) dans certains réseaux de métro

2 Moreno et al., Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. Environ. Res., 142, 495–510.

3 Chan, L., La u, W., Lee, S. et Chan, C. (2002). Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in HongKong. Atmos. Environ., 36(21), 3363–3373.

4 Gómez-Perales, et al., (2007). Bus, minibus, metro inter-comparison of commuters' exposure to air pollution in Mexico City. Atmos. Environ., 41, 890–901.

5 Onat, B. et Stakeeva, B. (2013). Personal exposure of commuters in public transport to PM_{2.5} and fine particle counts. Atmos. Pol. Res., 4, 329–335.

6 Suárez et al., (2014). Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile. Environmental science. Processes & impacts. 16. 10.1039/c3em00648d.

7 Moreno et al. (2017). The effect of ventilation protocols on subway system air quality. Science of the Total Environment 584–585, 1317–1323.

8 Karlsson et al., (2006). Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway. Toxicol. Letters, 165, 203-211.

9 Spagnolo et al., (2015). Chemical Characterisation of the Coarse and Fine Particulate Matter in the Environment of an Underground Railway System: Cytotoxic Effects and Oxidative Stress—A Preliminary Study. Int. J. Environ. Res. Public Health 12, 4031-4046.

10 Janssen et al., (2014) (2014). Oxidative potential of particulate matter collected at sites with different source characteristics. Sci. Tot. Environ., 472, 572–581.

11 Chillrud et al., (2004). Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and steel dust and New York City's subway system. Environ. Sci. Technol., 38, 732–7.

12 Gustavsson et al., (2008). Incidence of lung cancer among subway drivers in Stockholm. Am. J. Ind. Med., 51, 545–7.



Travaux du métro de Second Avenue, New York, 2013. MTA Capital Construction/Rehema Trimiew/Wikimedia, © BY-SA

LE RÔLE DES ROUES ET DES FREINS

Une grande partie des particules provient des pièces mobiles du train (comme les roues et les plaquettes de frein) ainsi que des rails en acier et des matériaux d'alimentation électrique. En effet, ces particules contiennent surtout du fer. Elles sont mélangées à des particules provenant d'autres sources, dont le ballast rocheux de la voie, les aérosols biologiques (comme les bactéries et les virus) et l'air provenant de l'extérieur. Elles voyagent dans les tunnels, portées par les courants d'air générés par les trains et les systèmes de ventilation.

Les facteurs qui influencent la pollution de l'air dans le métro sont le type de freins (électromagnétiques ou classiques) et de roues (en caoutchouc ou en acier) utilisés dans les trains, mais aussi la profondeur à laquelle se trouvent les stations ou leur date de construction, le type de ventilation (naturelle/climatisation), la fréquence des trains et, plus récemment, la présence ou non de parois coulissantes entre le quai et la voie.

Une grande partie des particules provient des pièces mobiles du train (comme les roues et les plaquettes de frein) ainsi que des rails en acier et des matériaux d'alimentation électrique

DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS, DIFFÉRENTS EFFETS

Le programme de mesure le plus complet jamais réalisé sur des quais de métro a été effectué à Barcelone : 30 stations de conceptions différentes ont été étudiées dans le cadre du projet IMPROVE LIFE¹³, avec le soutien complémentaire du Fonds AXA pour la Recherche.

Nous avons échantillonné un large éventail de lignes de métro et de types de stations. Nous pouvons en tirer plusieurs conclusions sur les types de stations de métro susceptibles d'avoir la meilleure ou la moins bonne qualité d'air dans un système donné.

Les stations de métro susceptibles d'afficher la plus mauvaise qualité d'air sont celles où le volume d'air est limité (les lignes à un seul tube avec un quai étroit), où les systèmes de ventilation sont peu performants ou mal conçus (surtout dans les stations situées en profondeur), qui ne sont pas équipées de parois coulissantes (qui pourraient préserver les usagers de l'air pollué du tunnel), où la topographie implique des changements de niveau et donc un freinage plus fort ou qui sont assez anciennes et remettent en suspension des années de particules polluantes.

¹³ L'objectif global du projet IMPROVE (Implementing Methodologies and Practices to Reduce air pollution Of the subway enVironmEnt, LIFE13 ENV/ES/263) consiste à tester des mesures permettant de réduire les concentrations de particules sur les quais et dans les trains, en tenant compte des variations de tous les facteurs clés : profondeur, ancienneté et conception des gares, type de ventilation, type de freins, fréquence des trains et présence ou non de parois coulissantes. Le projet mesure également la qualité de l'air à l'intérieur des voitures. <http://improve-life.eu/>



En fonction des matériaux de construction utilisés, les usagers des différents métros à travers le monde respirent différents types de particules.
Métro de Londres/Wikimedia, © BY-SA

Les stations de métro ayant la meilleure qualité d'air sont généralement les plus grandes et/ou les plus récentes, celles où les échanges avec l'air extérieur des rues est efficace (à condition de ne pas provenir des nœuds de circulation en ville), équipées de parois coulissantes sur toute la longueur des quais, avec une trajectoire droite et horizontale qui évite l'usure des roues et des freins.

Les stations dotées d'un seul tunnel, à une seule voie séparée du quai par des parois vitrées, présentaient en moyenne moitié moins de particules que les stations classiques, sans paroi entre le quai et les voies. Il a été démontré que l'utilisation de la climatisation permettait de limiter la concentration des particules à l'intérieur des wagons. De plus, la qualité de l'air des quais du métro est fortement influencée par le réglage du système de ventilation des tunnels (plus ou moins puissant) et varie s'il est introduit par impulsion ou évacué par extraction. En passant d'un système d'impulsion depuis la plateforme à un système d'extraction plus puissant depuis le tunnel, les particules inhalables ambiantes augmentent immédiatement, en particulier le nombre des particules les plus fines (submicroniques), celles-ci étant probablement aspirées du tunnel vers la plate-forme.

Dans les trains où il est possible d'ouvrir les fenêtres, comme à Athènes, les concentrations augmentent lors du passage dans les tunnels, notamment quand les trains entrent dans les tunnels à grande vitesse.

CONTRÔLE DES STATIONS ET AUTRES RECOMMANDATIONS

Bien qu'il n'existe aucune réglementation pour contrôler la qualité de l'air dans l'environnement du métro, il serait utile d'orienter les recherches vers des méthodes réalistes d'atténuation de la pollution particulière. D'après notre expérience dans le métro de Barcelone, où les stations et les systèmes de ventilation sont très variés, chaque station est un micro-environnement atmosphérique spécifique.

Pour concevoir des solutions, il faut donc tenir compte des conditions locales de chaque station. À partir de là, les chercheurs peuvent évaluer l'influence de la pollution générée par les pièces mobiles des trains. Ces recherches se développent de plus en plus, car les compagnies de transport sont désormais plus sensibles à l'importance d'un air de qualité pour la santé des usagers.

Voici quelques pistes à prendre en compte pour améliorer la qualité de l'air dans l'environnement du métro :

- On décèle dans l'air du métro les éléments ferreux issus des pièces mobiles des trains, ce qui soulève la question suivante : ces matériaux sont-ils aussi peu dangereux que possible ? Certains métaux identifiés - manganèse, cuivre, antimoine et chrome - sont connus pour produire des effets toxiques chez l'homme, c'est pourquoi nous demandons instamment que soient poursuivies les recherches sur la toxicité des particules polymétalliques inhalables par friction, en particulier celles qui proviennent des freins et des systèmes caténaires contenant du cuivre.
- La nuit, quand ni les trains ni les systèmes d'aération des quais ne fonctionnent, la qualité de l'air des quais s'améliore quand les ventilateurs des tunnels fonctionnent à faible puissance, que ce soit par impulsion ou par extraction. La diminution des déplacements de l'air, induite par la faible puissance du ventilateur et à l'absence d'effet de piston des trains, permet vraisemblablement aux particules de se déposer. Une diminution de la vitesse des trains sur les lignes présentant des courbes abruptes et des pentes marquées devrait permettre de réduire les émissions de particules chargées en fer.
- Le contrôle des échanges entre les masses d'air extérieur et souterrain peut être effectué avec des systèmes de ventilation intelligents, qui évitent de s'approvisionner en air issu des nœuds de circulation de la ville, après une réflexion approfondie sur les emplacements et la conception des grilles de ventilation extérieure, selon les principes suivants : impulsion de l'air extérieur vers les quais pendant les heures de circulation du métro, ventilation des quais à des fréquences supérieures à 25 Hz, extraction forcée de l'air extérieur au tunnel pendant les heures de service et systèmes de climatisation dans les trains.
- L'utilité des purificateurs d'air dépend de la distance avec les passagers et du débit.
- Parois coulissantes sur le quai : les lignes de métro modernes sont équipées de parois coulissantes, principalement pour la sécurité des voyageurs. Toutefois, celles-ci présentent aussi l'avantage de réduire les transferts d'air pollué des tunnels vers les quais, en particulier des particules inhalables de dimension assez importante.
- Entretien nocturne : certaines bonnes pratiques permettent de réduire le taux d'émission de poussières, comme un nettoyage le plus tôt possible dans la soirée et le recours à un dépoussiérant (eau et/ou polymère anti-resuspension) lors de la pose du ballast.

La pollution atmosphérique souterraine à laquelle s'exposent les usagers du métro ne serait pas plus toxique que celle produite par le trafic urbain de surface

QUE RESPIRONS-NOUS DANS NOS VOITURES ?

Caractérisation des polluants s'infiltrant dans les habitacles des véhicules

Amine Mehel
Enseignant-chercheur, ESTACA'Lab



300 différents types de polluants peuvent s'infiltrer dans l'habitacle des véhicules

L'ESTACA'Lab est le laboratoire de recherche de l'ESTACA, école d'ingénieurs spécialisée dans les systèmes de transports.

Amine Mehel est enseignant-chercheur au sein du pôle Matériaux, Mécanique et Énergétique ainsi que membre du groupe Qualité de l'air et traitement de la pollution, qu'il a contribué à créer à son arrivée à l'ESTACA, en 2010. Titulaire depuis 2006 d'un doctorat en mécanique des fluides délivré par l'École centrale de Nantes, il a axé ses travaux sur le transport et la dispersion des polluants dans les interactions avec des écoulements turbulents, la caractérisation et la mesure des polluants, la modélisation de la dynamique des particules ultrafines et les simulations CFD des flux multiphasiques.

L'habitacle d'un véhicule est un petit espace confiné dans lequel peuvent s'infiltrer des polluants extérieurs ou les émissions de ce même véhicule. En fonction des conditions de circulation et de la ventilation, ces polluants peuvent s'accumuler et avoir des conséquences néfastes sur la santé des passagers. Ces substances de différentes sortes (particules gazeuses ou ultrafines) peuvent atteindre des concentrations supérieures à celles constatées dans l'air extérieur.

Nos travaux de recherche portent principalement sur le processus d'infiltration, qui concerne de nombreux types de polluants. Le processus d'infiltration dépend de trois facteurs principaux : concentration des polluants dans l'air extérieur, topologie du flux aux points d'émission et paramètres internes au véhicule, comme le réglage de la ventilation. Nous procédons à des mesures embarquées et à des études en soufflerie, qui nous aident à identifier la dynamique des polluants en interaction avec la topologie du flux. Ces mesures, qui portent sur la dispersion des polluants à partir des sources d'émission et sur leur infiltration via les prises d'air, prennent en compte les niveaux de pollution à l'échelle locale.

L'étude de la dispersion en soufflerie montre que les particules ultrafines émises par les pots d'échappement s'accumulent au cœur des tourbillons qui se forment dans le voisinage immédiat du sillage des véhicules. Les prises d'air étant généralement situées à l'avant, ce phénomène accentue l'infiltration dans l'habitacle des véhicules suivants. On a également constaté que la distance entre les voitures, le mode de ventilation, la densité du trafic et la topologie de la route peuvent accentuer la pollution de l'air dans l'habitacle. En comprenant bien les effets de ces différents paramètres, nous pouvons améliorer la qualité de l'air dans l'habitacle des véhicules.

INTRODUCTION

Les concentrations de polluants gazeux et particulaires toxiques sont très élevées dans les zones urbaines, notamment à proximité des principaux axes de circulation et des autoroutes. Les véhicules routiers constituent d'ailleurs la première source d'émissions directes^{1,2,3}. Les polluants sont transportés depuis les secteurs à forte concentration vers les secteurs avoisinants, en particulier les véhicules. Ils peuvent s'infiltrer dans l'habitacle des véhicules et s'y accumuler : les passagers sont alors encore plus exposés à la pollution. Plusieurs études toxicologiques et épidémiologiques constatent d'ailleurs un lien entre l'exposition à ces niveaux élevés de polluants toxiques (parmi lesquels les particules ultrafines (PUF) et les oxydes d'azote (NOx)) et la recrudescence des maladies respiratoires, des allergies et de l'asthme⁴, entre autres problèmes de santé à long terme, comme le cancer du poumon et les pathologies cardiovasculaires⁵.

L'évaluation de l'exposition à ces polluants repose sur deux caractéristiques clés : la concentration et la taille des particules (pour les PUF). Il a été démontré que le rapport entre les concentrations intérieures et les concentrations extérieures

(I/E) durant le processus d'infiltration dépend en grande partie de paramètres internes au véhicule : kilométrage, âge, vitesse, réglages de la ventilation, mode de ventilation (recyclage activé ou désactivé)⁶. Les paramètres externes interviennent aussi, notamment la topologie du flux local^{7,8,9}. Dans nos travaux de recherche, nous nous sommes intéressés aux concentrations de polluants selon deux approches. La première consiste à mesurer les concentrations embarquées de polluants (internes et externes) en fonction des différents réglages de ventilation et de la distance inter-véhicules.

La seconde, menée en soufflerie, porte sur le processus d'infiltration à petite échelle. Dans cette étude, nous nous intéressons d'abord à la dispersion des PUF à partir du point d'émission (le pot d'échappement) et à leur interaction avec le flux dans le sillage immédiat du véhicule et au niveau des prises d'air. Ensuite, nous examinons l'infiltration des PUF dans une voiture en modèle réduit. La conjugaison de ces deux approches nous permet non seulement d'affiner la méthodologie de mesure (par exemple, la position de la sonde extérieure) mais aussi de comprendre le processus d'infiltration des polluants, l'objectif étant de mettre au point des solutions d'amélioration de la qualité de l'air dans l'habitacle.

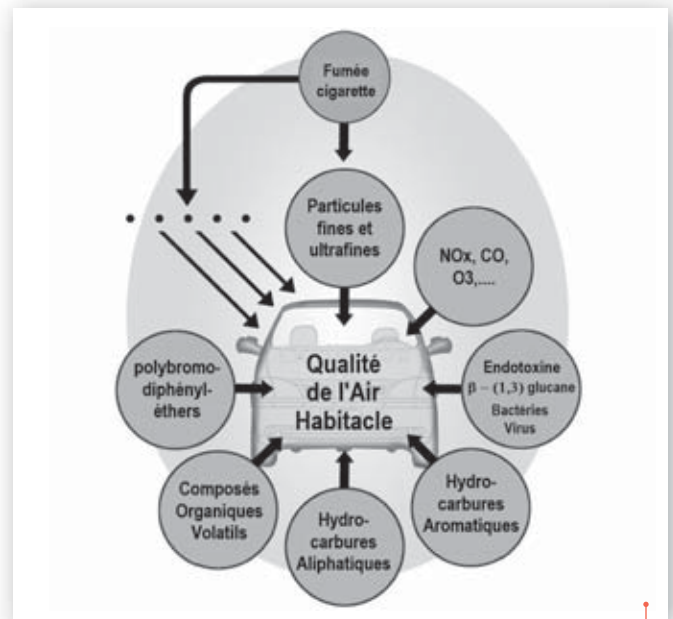


Figure 1 : Types de polluants communément trouvés dans l'habitacle des véhicules (selon Muller et al. (2011) [8])

POLLUANTS PRÉSENTS DANS L'HABITACLE DES VOITURES

Dans un espace aussi réduit et confiné que l'habitacle d'une voiture, on trouve parfois plus de 300 types de gaz carbonés, notamment des Composés organiques volatils (COV)¹⁰, des comburants gazeux (NOx, CO, etc.) et des particules^{11,12} (cf. figure 1).

On trouve des COV¹³ en quantité dans les véhicules neufs. Ceux-ci proviennent des émissions de différents produits : cuir naturel ou artificiel, polystyrène, polyéthylène, polypropylène, polyamide, colles, peintures, mousse de polyuréthane, etc. Ces matériaux composent les tableaux de bord, les garnitures intérieures, les revêtements des sièges, les matériaux de revêtement du plancher, etc. Malheureusement, les concentrations des produits chimiques relâchés par ces composants dans l'espace confiné de l'habitacle d'une voiture sont largement supérieures (jusqu'à dix fois) à celles constatées dans l'air ambiant¹⁴.

La pollution de l'habitacle provient aussi de l'extérieur. C'est même le processus d'infiltration qui contribue en priorité à la hausse de la concentration des particules ultrafines (PUF), des matières particulaires (PM), des NOx, du CO, du SO₂ et du HC dans les habitacles. Le processus d'infiltration est un corollaire de l'entrée d'air dans l'habitacle, laquelle est due à la ventilation, aux fenêtres ouvertes ou aux fuites. Il a été démontré que le rapport entre les concentrations intérieures et les concentrations extérieures (I/E) lors du processus d'infiltration dépend largement de paramètres internes au véhicule tels que son kilométrage, son âge, sa vitesse et les réglages de sa ventilation, ainsi que son mode de ventilation

(recyclage activé ou désactivé)⁵. Toutefois, il est également fonction de paramètres externes comme le trafic, la topologie de la route ou la météo¹⁶. Les nanoparticules ultrafines ont fait l'objet de nombreuses études car leur niveau de toxicité est suffisamment élevé pour qu'elles soient considérées comme cancérigènes par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) ou l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Elles ont également des effets néfastes non négligeables sur la santé, à l'instar des COV^{4,5}. Leur dynamique particulière induit des niveaux de concentration très variables, car les particules de petite taille sont très sujettes à l'influence des turbulences et de la diffusion brownienne¹⁷. Par conséquent, il est important de caractériser la topologie du flux local avant de pouvoir comprendre le processus d'infiltration des polluants dans l'habitacle des véhicules.

CARACTÉRISATION DE L'INFILTRATION DES POLLUANTS DANS L'HABITACLE DES VÉHICULES : APPROCHES EXPÉRIMENTALES TYPQUES

Nous avons déjà mentionné notre approche, originale mais nécessaire, consistant à associer des mesures embarquées et en laboratoire pour comprendre le transport des polluants depuis leur point d'émission jusqu'à leur infiltration dans l'habitacle. Dans ce paragraphe, nous allons décrire le dispositif expérimental typique de mesure embarquée permettant d'évaluer le rapport I/E de plusieurs polluants. Nous décrivons également les études en soufflerie permettant de caractériser la dispersion des PUF en corrélation avec la topologie du flux. Nous détaillons ci-dessous la méthodologie utilisée pour les deux approches dans le cadre du projet « CAPTIHV », mené pour identifier les polluants issus du transport automobile et leur infiltration dans les habitacles des véhicules.

* La diffusion brownienne désigne le mouvement aléatoire des petites particules causé par la collision des molécules dans l'air.



Figure 2 : Sondes extérieure (a) et intérieure (b) utilisées pour mesurer les concentrations de polluants © Amine Mehel

La première approche regroupait des mesures embarquées simultanées des concentrations intérieures et extérieures de polluants gazeux (NOx) et de particules ultrafines dans des conditions réelles de roulage, en région parisienne. Le rapport entre les concentrations intérieures et extérieures (I/E) a été mesuré en termes de concentrations massiques de polluants gazeux et de particules, et de concentrations numériques pour les PUF. L'échantillonnage a été obtenu à l'aide de deux sondes installées du côté gauche du véhicule et à la hauteur de la bouche du passager pour l'air intérieur (figure 2). Enfin, nous avons effectué un enregistrement vidéo synchronisé pour bénéficier d'informations supplémentaires. Ce dispositif permet d'analyser ultérieurement tout événement particulier survenant à l'avant du véhicule.

Pour cette étude, nous avons utilisé un véhicule utilitaire Renault Kangoo (modèle 2006, équipé de filtres d'habitacle fournis par le constructeur). Il convient de noter que les fenêtres étaient fermées lors de tous les déplacements, que la ventilation était activée (sur un débit intermédiaire) et que le recyclage de l'air était éteint. Le débit de la ventilation était réglé en position intermédiaire tout au long de l'étude. Des mesures ont également été effectuées en vue de caractériser l'influence des paramètres de ventilation et des fenêtres sur le rapport I/E à bord de deux véhicules successifs. Celui

placé en amont était une Kangoo tandis que celui placé en aval était soit un véhicule équipé d'un moteur diesel de 2006 et de filtres d'habitacle fournis par le constructeur, soit un véhicule à essence de 2016 doté de filtres d'habitacle fournis par le constructeur et affichant 20 000 km au compteur. L'originalité de ces mesures sur deux véhicules successifs tient à la réduction de l'influence du type de voiture amont (type de moteur, type de modèle, etc.) sur les émissions à l'avant du véhicule faisant l'objet de l'étude.

La campagne de mesures embarquées a été conduite entre le mois d'avril 2016 (temps ensoleillé, températures entre 5°C et 20°C) et le mois de décembre 2017 (températures entre 1°C et 15°C). Plusieurs itinéraires ont été testés à différents moments de la journée (matin, milieu de journée, soirée). En fonction du type de route (autoroute, urbain, périphérique), le trafic allait de fluide à dense. Nous avons parcouru une distance totale de 107 km sur une période de trois heures. Les mesures ont été effectuées à des vitesses allant de 10 km/h⁻¹ à 130 km/h⁻¹. Pour les mesures en soufflerie, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la dispersion des PUF en aval d'une maquette de type corps d'Ahmed en modèle réduit¹⁹, (figure 3a). Le deuxième modèle de voiture, (b) de type MIRA, est utilisé en tant que voiture suiveuse. Doté de trois prises d'air, il est creux, de façon à permettre les mesures et l'infiltration des PUF.



Figure 3 : Maquettes de voitures utilisées pour étudier les infiltrations : (a) corps d'Ahmed, (b) maquette MIRA © Amine Mehel

Le flux d'air étudié a été fixé à une vitesse de $U_{\infty}=12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond aux zones urbaines. Nous avons cherché à simuler la dispersion des PUF à partir des pots d'échappement des véhicules dans les zones urbaines en aval de la maquette, puis leur infiltration dans un modèle Mira en aval. Pour y parvenir, nous avons injecté des PUF d'une taille allant de 20 à 100 nm, puis nous avons caractérisé leur dispersion en corrélation avec leurs interactions avec le champ d'écoulement²⁰.

LE RAPPORT I/E ET LES PARAMÈTRES D'INFLUENCE

Nous avons déjà pu constater que plusieurs paramètres internes influent sur le rapport I/E, notamment le mode de ventilation (air frais venant de l'extérieur, Air extérieur ou Air recyclé). Ces éléments ont été confirmés par les résultats du projet CAPTIHV. En effet :

- quand le mode ventilation Air recyclé est activé, seul 22 à 40 % du NO_2 s'infiltré dans l'habitacle. Pour les PUF, les taux oscillent entre 25 % et 90 %.
- quand le mode Air extérieur est activé, tous ces polluants s'infiltrent dans l'habitacle.

Le tableau ci-dessous présente les rapports moyens de la campagne de mesures effectuée sur l'intégralité d'un véhicule (Kangoo) :

Polluant	Valeur	C_{int} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [(#/ cm^3) pour PN]	C_{ext} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [(#/ cm^3) pour PN]	Rapport (I/E) ($\overline{R_{I/E}}$ pour la valeur moyenne)	Rapport (I/E) moyen $R_{I/E}$
NO_2	Moyenne	80	117	0,82	0,68
	Maximum	1457	4757	50,00	-
PN	Moyenne	42 000	44 000	1,11	0,95
	Maximum	391 000	421 000	24,18	-
PM_{10}	Moyenne	27	28	1,07	0,96
	Maximum	582	1760	16,17	-
$\text{PM}_{2,5}$	Moyenne	26	25	1,10	1,04
	Maximum	1 760	1 760	8,60	-

Tableau 1 : Rapports de concentration I/E observés pour différents polluants lors de la campagne de mesures embarquées effectuée sur l'intégralité d'un véhicule

Nous remarquons qu'en fonction du type de polluant, les valeurs moyennes peuvent être supérieures à 1, ce qui signifie que les passagers peuvent être plus exposés que s'ils étaient à l'extérieur de l'habitacle. Nous observons également que le rapport $R_{I/E}$ pour le NO_2 , les PN et les PM_{10} , contrairement au rapport instantané moyen ($\overline{R_{I/E}}$), est inférieur à 1. C'est notamment le cas pour le NO_2 (0,68), ce qui tend à prouver que les passagers sont moins exposés au NO_2 dans le véhicule même si le mode de ventilation est réglé sur Air extérieur.

Au-delà des paramètres internes au véhicule, les paramètres externes, notamment le type de route, la densité du trafic ou la météorologie, peuvent également avoir une incidence sur les rapports I/E. Fruin et al.²¹ ont conduit une vaste campagne de caractérisation des niveaux de polluants de l'air extérieur où les PM (concentrations en masse particulaire), les PUF (concentrations en nombre), les NOx, le CO et le CO_2 ont été mesurées. Cette campagne a montré que le type de route (autoroute, tunnel, route à grande circulation) constitue le

Voici deux définitions concernant le calcul du rapport I/E moyen :

$$\overline{R_{I/E}} = \left(\frac{C_{\text{int}}}{C_{\text{ext}}} \right) \quad (1)$$

$$R_{I/E} = \frac{C_{\text{int}}}{C_{\text{ext}}} \quad (2)$$

La première (équ. 1) permet d'établir la moyenne des rapports instantanés (c'est-à-dire la moyenne globale du rapport entre la concentration dans l'habitacle et la concentration extérieure, qui est mesurée toutes les dix secondes. La seconde, qui est généralement présentée dans les études, renvoie au rapport entre les concentrations moyennes dans l'habitacle et les concentrations moyennes à l'extérieur).

Le rapport moyen instantané $\overline{R_{I/E}}$ est indiqué pour caractériser le processus d'infiltration, par exemple lors de la caractérisation des filtres habitacle. Le $R_{I/E}$ est le rapport entre la concentration moyenne dans l'habitacle et la concentration moyenne à l'extérieur. Étant donné que l'on s'appuie sur les concentrations moyennes mesurées pendant tout le trajet, il s'avère possible d'évaluer l'exposition des passagers, ce qui en fait un outil plus indiqué dans notre cas.

principal facteur de variation des concentrations de PM, PUF et NO . C'est également la conclusion à laquelle a abouti le projet CAPTIHV. En effet, les tunnels contribuent à l'accroissement des concentrations extérieures et dans l'habitacle selon un ratio de 1,6 à 1,9 respectivement pour le NO_2 et selon un ratio de 2 pour les PN. En outre, le temps passé dans un tunnel a aussi son influence. Plus on s'y attarde, plus les concentrations augmentent (figure 4). Ainsi, les tunnels ont un fort impact sur le rapport I/E, comme cela a été constaté par Kaminsky²². Le projet CAPTIHV a également montré que le boulevard périphérique parisien influe considérablement sur la concentration des polluants ci-dessus dans l'habitacle et à l'extérieur, selon un ratio de 1,6.

Les mesures embarquées à deux véhicules ont également permis d'évaluer l'influence de la distance inter-véhicules sur le rapport I/E. Sachant que la topologie du sillage de l'écoulement de la voiture dépend de la distance par rapport au véhicule amont, ce paramètre influe sur la dynamique des particules et

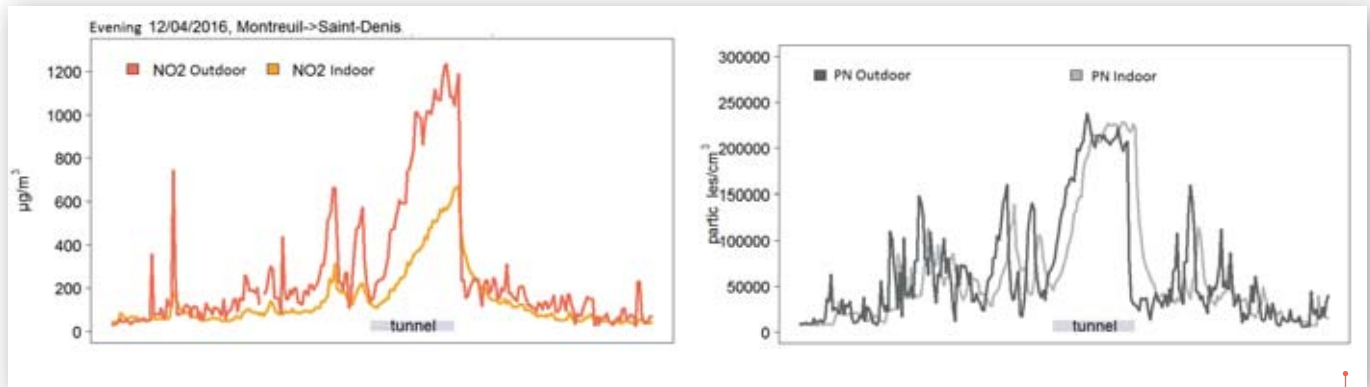


Figure 4 : Évolution dans le temps des concentrations de NO2 et de PN dans l'habitacle et à l'extérieur sur une route typique comportant un tunnel

donc sur leur infiltration. Cet aspect a également été étudié en détail lors des études en soufflerie (paragraphe suivant).

Les mesures embarquées ont permis de déterminer l'évolution dans le temps des concentrations à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule, ainsi que les rapports I/E. Les résultats sont exposés dans la figure 2 pour les NOx et dans la figure 3 pour les PUF.

IMPACT DE LA TOPOLOGIE DU FLUX SUR L'INFILTRATION DE PUF DANS L'HABITACLE DES VÉHICULES

Pour bien comprendre l'influence de la proximité entre plusieurs voitures en déplacement et, plus spécifiquement, celle des distances inter-véhicules, nous avons procédé à des mesures en soufflerie qui permettent de caractériser de façon plus détaillée le lien entre la topologie du flux et les mécanismes de dispersion / infiltration des PUF.

La figure 5 montre la topologie du flux dans l'écoulement du sillage du corps d'Ahmed en première position. On y observe deux structures tourbillonnaires contrarotatives, qui constituent ce que l'on appelle la zone de recirculation.

Les particules ultrafines émises par le pot d'échappement de la maquette du corps d'Ahmed interagissent avec ces tourbillons, qui à leur tour influent sur la dynamique des particules et donc sur leur dispersion. Les concentrations sont présentées sous forme adimensionnées dans la figure 6. Dans la zone de recirculation, la

dispersion verticale des PUF est renforcée par la présence de deux tourbillons (figure 6). Comme attendu, le point de concentration maximale correspond au point d'émission situé au niveau du pot d'échappement.

La maquette suiveuse MIRA est équipée de trois entrées d'air. Elles ont été ouvertes à tour de rôle et des mesures de concentration ont été prises à l'extérieur et à l'intérieur de la maquette pour connaître les rapports I/E.

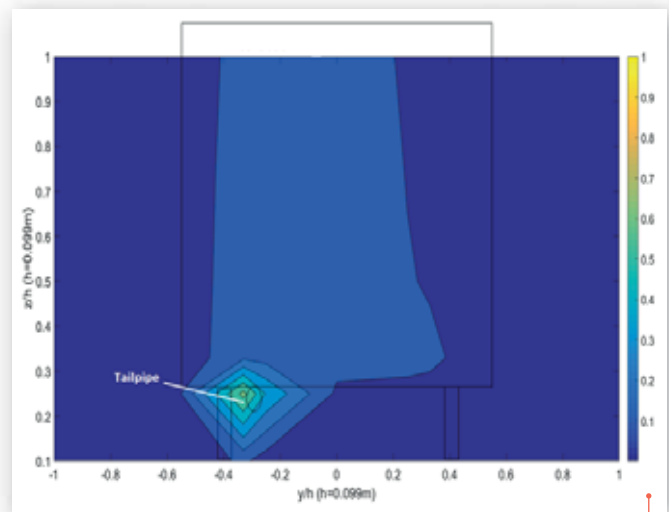


Figure 6 : Champ des concentrations en nombre de particules sur le plan yz à une distance de x/H=0,5 de l'arrière du corps d'Ahmed

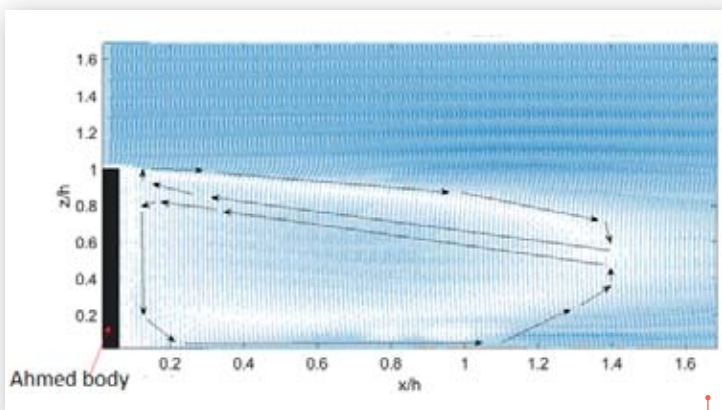


Figure 5 : Topologie de l'écoulement du sillage du corps d'Ahmed à culot droit

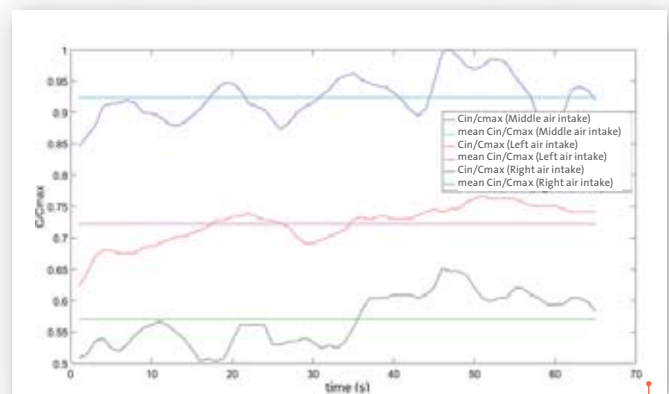


Figure 7 : Influence de la position de l'entrée d'air sur les concentrations adimensionnées intérieures en nombre de particules

Les résultats ont montré que la position de l'entrée d'air influence le processus d'infiltration. Comme on peut le constater dans la figure 7, la concentration adimensionnée est plus élevée pour la prise d'air centrale (située au milieu) que pour celle de gauche, qui, à son tour, est supérieure à celle mesurée pour celle de droite. Ceci s'explique par la distribution de la concentration en nombre de particules, qui montre que les PUF se dispersent verticalement avant de s'accumuler dans la zone de recirculation et de se diffuser de façon longitudinale et transversale.

CONCLUSION

La pollution à l'intérieur des véhicules automobiles est induite par les émissions de polluants internes et par les polluants externes qui s'y infiltrent. Il s'agit principalement de NO_x, CO, CO₂, PUF, PM et VOC spécifiques (BTEX). Dans les deux cas, les paramètres internes au véhicule tels que la position des fenêtres, l'âge du véhicule et, en particulier, le mode de ventilation et le débit peuvent influencer sur les concentrations de polluants dans l'habitacle. En outre, le processus d'infiltration des polluants est conditionné à la fois par ces paramètres internes et par des paramètres externes tels que le type et la densité du trafic, le type de route (tunnels, etc.) ainsi que le type et la vitesse des véhicules meneurs (en amont du véhicule étudié).

Dans nos études, notamment dans le cadre du projet CAPTIHV, nous avons eu recours à deux approches pour examiner la dispersion et l'infiltration des polluants gazeux et particulaires à l'intérieur de l'habitacle. Grâce aux mesures effectuées en soufflerie, nous avons réussi à connaître la distribution des concentrations en polluants émis par le pot d'échappement d'une maquette de voiture. Ces concentrations sont fortement corrélées à l'écoulement de sillage, lequel dépend à son tour des caractéristiques aérodynamiques de la voiture. Le processus d'infiltration a été étudié à l'aide de mesures embarquées et d'essais en soufflerie utilisant une maquette creuse dotée de trois entrées d'air situées à trois endroits différents. Il a été démontré que l'infiltration des polluants, notamment des PUF, dépend des distances inter-véhicules et de la position de l'entrée d'air.

Cela montre que l'amélioration de la qualité de l'air dans l'habitacle d'un véhicule peut s'avérer très compliquée et qu'il est donc nécessaire de mener de nombreuses études et simulations à différentes échelles (en local, en amont et à l'intérieur de l'habitacle) pour espérer approfondir nos connaissances et mettre en place des solutions permettant d'obtenir un air plus propre dans les habitacles.

Il est déjà possible de formuler quelques recommandations. Par exemple, dans un contexte de circulation dense ou sur certains types d'infrastructures (notamment les tunnels), il est préférable d'activer le mode recyclé. Néanmoins, il vaut mieux ne pas le laisser fonctionner pendant plus de 15 minutes car la concentration de CO₂ dans l'habitacle a tendance à augmenter, ce qui n'est pas recommandé au volant. Enfin, nous conseillons de conserver une distance d'au moins cinq mètres par rapport à la voiture située devant, de façon à réduire au maximum l'infiltration des polluants.

RÉFÉRENCES

- 1 Biswas S., Hu S., Verma V., Herner J., Robertson W.J., Ayala A. et Sioutas C. Physical Properties of particulate matter (PM) from late model heavy duty diesel vehicles operating with advanced emission control technologies. *Atmospheric environment*, 42, 2008
- 2 Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne E.R., Keogh D.U. et Ling, X. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment* 42, 8113-8138, 2008
- 3 Boulter P. G., Borken-Kleefeld J. et Ntziachristos L., The Evolution and Control of NO_x Emissions from Road Transport in Europe, *The Handbook of Environmental Chemistry*, chap. Urban Air Quality in Europe, 26, 31-53, 2012
- 4 Li N., Hao M.Q., Phalen R. F., Hinds W.C. et Nel A. E. Particulate air pollutants and asthmas. A paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects. *Clinical Immunology*, 109, 250-265, 2003
- 5 Delfino R.J., Malik S. et Sioutas C., 2005. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives* 113, 934-946
- 6 Hudda N., Eckel S. P., Knibbs L. D., Sioutas C., Delfino R. J. et Fruin S. A. Linking in-vehicle ultrafine particle exposures to on-road concentrations. *Atmospheric Environment* 59, 578-586, 2012
- 7 Goel A. et Kumar P. Zone of influence for particle number concentrations at signalised traffic intersections. *Atmospheric Environment*, 123, 25-38, 2015
- 8 Takano Y. et Moonen P. On the influence of roof shape on flow and dispersion in an urban street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 107-120, 2013
- 9 Mehel A. et Murzyn F. Effect of air velocity on nanoparticles dispersion in the wake of a vehicle model: Wind tunnel experiments. *Atmospheric Pollution Research*, 6(4), 612-617, 2015
- 10 Yoshida T., Matsunaga I., Tomioka K. et Kumagai S. Interior air pollution in automotive cabins by volatile organic compounds diffusing from interior materials: I. Survey of 101 types of Japanese domestically produced cars for private use. *Indoor Built Environ*; 15: 425-444, 2006
- 11 IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer; 1989. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 46.) 1, Composition of Engine Exhausts
- 12 C. L. Myung et S. Park. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review. *International journal of automotive technology*, 13, 1, pp. 9-22, 2012
- 13 Yoshida T., Matsunaga I., Tomioka K. et Kumagai S. Interior air pollution in automotive cabins by volatile organic compounds diffusing from interior materials: II. Influence of Manufacturer, Specifications and Usage Status on Air Pollution, and Estimation of Air Pollution Levels in Initial Phases of Delivery as a New Car. *Indoor Built Environ* 2006; 1 (5): 445-462
- 14 Brodzik K., Faber J., Tomankiewicz D. et Gołda-Kopek A. In-vehicle VOCs composition of unconditioned, newly produced cars. *J. Environ. Sci.* 26 (5) 1052-61, 2014
- 15 Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J., et Colville, R.N. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments, *Atmospheric Environment*, 41 (23), pp. 4781-4810, 2007
- 16 Mehel A., Murzyn F., Joly F., Bruge B., Cuvelier Ph. et Patte-Rouland B., On-board measurements to assess in-cabin vehicle air quality in Paris, *Proceedings 22nd International Transport and Air Pollution Conference, Zürich, Switzerland*, 15-16 novembre 2017
- 17 Mehel A., Tanière A., Oesterlé B. et Fontaine J.R. On dispersion models for the prediction of micro- and nanoparticle deposition in wall-bounded turbulent flows, *Journal of Aerosol Science*, 41(8), pp. 729-744, 2010
- 18 Müller D., Klingelhöfer, D., Uibel, S. et Gronenberg D. A. Car indoor air pollution - analysis of potential sources. *J Occup Med Toxicol*, 6(33), 2011
- 19 Ahmed S. R., Ramm G. et Faitin G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake (No. SAE-TP-840300). Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA
- 20 Mehel A. et Rolin E. Wind tunnel study of ultrafine particles infiltrating car cabin, *Proceedings 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Salonique, Grèce*, 15-17 mai 2019
- 21 Fruin S., Westerdahl D., Sax T., Sioutas C. et Fin P.M. Measurements and predictors of on-road ultrafine particle concentrations and associated pollutants in Los Angeles, *Atmospheric Environment*, 42, pp.207-219, 2008
- 22 Kaminsky J.A., Gaskin E.A.L.M., Matsuda M. et Miguel A.H. In-Cabin Commuter Exposure to Ultrafine Particles on Commuter Roads in and around Hong Kong's Tseung Kwan O Tunnel, *Aerosol and Air Quality Research*, 9, pp. 353-357, 2009

Références complémentaires :

- Zhu Y., Eiguren-Fernandez A., Hinds W.C. et Miguel A.H. In-cabin commuter exposure to ultrafine particles on Los Angeles freeways. *Environmental Science & Technology* 41, 2138-2145, 2007
- Knibbs L.D., de Dear R.J. et Morawska L. Effect of cabin ventilation rate on ultrafine particle exposure inside automobiles. *Environmental Science & Technology*, 44, pp 3546-3551, 2010

2. AGIR POUR UN AIR INTÉRIEUR SAIN : DE LA MESURE À LA REMÉDIATION



De nombreuses solutions émergent pour relever le défi de la qualité de l'air intérieur, qu'il s'agisse d'approches sectorielles telles que celles mises en œuvre par les professionnels du bâtiment, de solutions technologiques innovantes basées sur l'intelligence artificielle ou sur des capteurs, ou encore de mécanismes de remédiation biologiques.

MIEUX CONSTRUIRE POUR MIEUX RESPIRER

Face aux enjeux de la qualité de l'air intérieur, une première approche est d'ordre technique et sectoriel. L'industrie du bâtiment, l'un des secteurs économiques les plus concernés par la qualité de l'air intérieur, œuvre pour réduire les pollutions à la source et développe des labels pour garantir la bonne performance des matériaux et des procédés en matière de qualité de l'air. L'architecte autrichien Dietmar Feichtinger explique que la prévention de la mauvaise qualité de l'air doit commencer dès la phase de conception du bâti. Il est notamment nécessaire d'analyser finement les contraintes et besoins spécifiques à un bâtiment et à ses futurs usagers, afin d'être en mesure de proposer des solutions de remédiation adaptées et correctement dimensionnées.

ASSOCIER EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SÉCURITÉ SANITAIRE

La performance énergétique des bâtiments, qui passe notamment par le renforcement de l'étanchéité à l'air, ne doit pas se faire au détriment de la qualité de l'air intérieur. Il s'agit ainsi de concilier un objectif d'efficacité énergétique avec les paramètres de la qualité de l'air intérieur (dans ses aspects chimiques, biologiques et particulaires), tout au long de l'exploitation du bâtiment. Pour répondre à ce défi, l'approche d'OFIS Veolia, présentée par Sabine Fauquez et Frédéric Bouvier, repose sur trois piliers : l'évaluation de la qualité de l'air en continu, le pilotage des installations de ventilation et de traitement de l'air, et l'implication des occupants du bâtiment dans l'amélioration de la qualité de l'air. Les projets conduits par OFIS dans certaines écoles en France et en République Tchèque sont à cet égard instructifs.

DATA OU BIOLOGIE : LA SCIENCE AU SERVICE DE L'AIR

En matière d'innovation, l'un des principaux enjeux réside dans le choix de techniques et technologies adaptées aux différents usages et assurant la qualité et la fiabilité des données recueillies. Karine Léger, directrice d'Airparif, association agréée rassemblant des acteurs économiques, des instituts de recherche ainsi que des représentants des pouvoirs publics en Ile-de-France, présente plusieurs initiatives pour accompagner l'innovation au service de la qualité de l'air : le projet AIRLAB vise notamment à tester et à évaluer des solutions innovantes de mesure et de dépollution. L'une des voies de développement technologique porte sur l'intelligence artificielle, comme l'illustre l'exemple de l'entreprise Airvisual fondée par Yann Boquillod, en Chine. Une autre piste de solution, complémentaire, repose sur le potentiel de dépollution des plantes et de leur microbiote racinaire. Bill Wolverton et Mark Nelson présentent les conclusions d'études réalisées notamment pour la NASA sur la phytoremédiation, procédé par lequel, sous des conditions spécifiques, des plantes et leurs microorganismes associés purifient l'air et l'eau en y prélevant des agents polluants.

Cédric Baecher, Fanny Sohui,
Leah Ball et Octave Masson,
Coordinateurs,
Nomadéis

SURVEILLER, INFORMER, COMPRENDRE, INNOVER : le rôle d'Airparif, association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air

Karine Léger,
Directrice d'Airparif



Installation de micro-capteurs dans le cadre du Challenge
« AIRLAB Micro-capteurs 2019 »
©MTES (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire)

Karine Léger, ingénieure spécialisée en Environnement, a rejoint Airparif, association agréée par le ministère de l'Environnement pour la surveillance de la qualité de l'air de l'Île-de-France, en 2001. Elle a d'abord travaillé comme ingénieure d'étude avant de devenir adjointe au directeur en charge de la communication et de l'international. Elle a par la suite occupé le poste de directrice opérationnelle en charge de la communication, des partenariats et du digital, où elle a notamment contribué au développement de nouveaux métiers et à l'ouverture de l'association sur un périmètre d'action international. Elle a par exemple été coordinatrice du projet Citeair II, qui a permis le développement d'un indice d'évaluation de la qualité de l'air en temps réel à l'échelle européenne¹. Karine Léger a été nommée directrice d'Airparif en 2018.

¹ Reflet du projet, le site Internet www.airqualitynow.eu offre les prévisions de qualité de l'air en ligne ; il est traduit en plus de dix langues, et accessible via les réseaux sociaux et la téléphonie.

La surveillance de la qualité de l'air ambiant est assurée en France par des associations indépendantes comme Airparif (type loi de 1901) agréées par l'État. Le rôle d'Airparif est principalement de renseigner et d'analyser les phénomènes atmosphériques (sur le long terme mais aussi en cas d'épisode de pollution), d'assister les décideurs dans leurs plans d'action, de soutenir l'innovation et d'informer les différentes parties prenantes.

Les enjeux relatifs à la qualité de l'air sont particulièrement importants dans les villes. La qualité de l'air intérieur est le parent pauvre de cette thématique, le grand public étant plus sensibilisé à la pollution atmosphérique qu'à celle existant à l'intérieur des bâtiments. Pourtant, du fait de l'accumulation des différents polluants, mais aussi parce que la qualité de l'air intérieur dépend de celle de l'air extérieur, la qualité de l'air intérieur peut être plus dégradée qu'à l'extérieur. L'enjeu est d'autant plus important que nous passons près de 80 % de notre temps dans des espaces clos.

Pour répondre à ces enjeux, Airparif accompagne l'innovation au travers de l'AILAB, une plateforme rassemblant des acteurs économiques, des acteurs de la recherche ainsi que des représentants des pouvoirs publics, qui vise à tester et évaluer des solutions innovantes de mesure et de dépollution. En matière de qualité de l'air intérieur, l'un des projets d'AILAB consiste à tester différentes catégories de micro-capteurs en fonction de leurs usages notamment en air intérieur pour éclairer en toute indépendance les utilisateurs sur l'adéquation du produit avec ses usages envisagés. Airparif intervient également ponctuellement auprès des acteurs publics, à leur demande, pour effectuer des actions de vérification et de conseil permettant de valider et d'interpréter des données de qualité de l'air intérieur obtenues sur des périmètres à forts enjeux, par exemple dans les établissements recevant du public sensible. Les travaux de l'association visent enfin également à renseigner l'exposition quotidienne des Franciliens à la pollution de l'air, en intégrant les travaux et données existantes sur la qualité de l'air intérieur.

Pouvez-vous nous présenter Airparif ?

Karine Léger : Airparif est une association indépendante loi 1901 créée en 1979, chargée de surveiller et d'informer sur la qualité de l'air ambiant en Ile-de-France. L'association est agréée par le ministère de l'Environnement. Son conseil d'administration rassemble les différents acteurs impliqués dans les enjeux de pollution de l'air, au sein de quatre collèges équilibrés réunissant : des représentants de l'État (le Préfet de la région Île-de-France, le Préfet de Police de Paris, le Ministère de l'Environnement, etc.) ; des collectivités territoriales d'Île-de-France (le Conseil régional d'Île-de-France, la Mairie de Paris, le Syndicat des Transports d'Île-de-France etc.) ; des acteurs économiques (les industries soumises à la TGAP² rassemblées au sein du collectif AIRASIF, Air Liquide, Faurecia, le groupe EDF, ENGIE, ICADE, VEOLIA, ENEDIS, etc.) ; et enfin des associations agréées de protection de l'environnement (FNE, les Amis de la Terre, WWF France, association Respire) et des consommateurs, ainsi que des personnalités ou associations qualifiées (ex : représentants des professions de santé ou de la recherche).

Avec une agglomération de plus de 10 millions d'habitants, un trafic important et une forte densité de bâtiments, l'agglomération parisienne est particulièrement concernée par les enjeux de pollution de l'air. Airparif agit de plusieurs manières pour répondre au « *droit à chacun de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé* » fixé par la loi LAURE (Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie³) : premièrement, l'association surveille quotidiennement les niveaux de pollution de l'agglomération. Avec un ensemble complet d'outils techniques (71 stations de mesure, des outils de modélisation, des campagnes de mesure et un inventaire d'émissions), 65 salariés et un budget annuel de 8,5 millions d'euros en 2016, Airparif renseigne et cartographie toutes les heures 6 millions de points sur l'ensemble de la région. En particulier, les actions de modélisation jouent un rôle déterminant.

La modélisation est utilisée :

- Comme outil d'aide à la décision pour les prévisionnistes ;
- Pour évaluer l'impact des mesures prises ou envisagées par les autorités ;
- Pour alimenter les bulletins d'information quotidiens ;
- Pour calculer tous les ans la superficie du territoire et le nombre de personnes exposées à des niveaux qui ne respectent pas la réglementation ;
- Pour des applications comme « itinerair »⁴ permettant de choisir un trajet pour être moins exposé à la pollution en tant que cycliste ou piéton.

La qualité de l'air intérieur est le parent pauvre de la thématique « qualité de l'air »

² Taxe générale sur les activités polluantes.

³ Cette loi-cadre, édictée le 30 décembre 1996 vise à rationaliser l'utilisation de l'énergie et à définir une politique publique intégrant l'air en matière de développement urbain. Le droit de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé est reconnu à chacun. Elle est codifiée dans le code de l'environnement.

⁴ <https://www.airparif.asso.fr/actualite/detail/id/175>

Quelles sont les activités d'Airparif en matière de qualité de l'air intérieur ?

K.L. : En matière de qualité de l'air intérieur, les actions menées par Airparif sont ponctuelles et spécifiques et interviennent en complémentarité de l'action d'autres parties prenantes telles que des bureaux d'études ou des observatoires spécialisés (ex : Observatoire de la qualité de l'air intérieur). Il peut s'agir par exemple d'accompagner une Région, un Département ou encore un établissement public ayant effectué des mesures de qualité de l'air dans un contexte particulier et recherchant une expertise pour valider les données obtenues ou pour les interpréter. Airparif intervient en analysant les différents contextes, en prenant des mesures de la qualité de l'air complémentaires, puis en objectivant les mesures initialement présentées. Afin de garantir la crédibilité des mesures réalisées et de répondre aux besoins de la population et des autorités, Airparif s'est engagé dans une démarche qualité qui a abouti à l'obtention de la Certification ISO 9001 et de l'Accréditation ISO/CEI 17025 Section Laboratoires. Ce rôle de tiers de confiance fait partie de l'ADN de l'association.

Airparif intervient également auprès du Ministère de l'environnement dans l'appui à l'élaboration de protocoles nationaux homogènes d'interventions et d'analyses de données, à destination de toutes les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) en France.

Avez-vous observé une évolution dans la perception qu'ont les citoyens de la qualité de l'air ?

K.L. : Pendant des années, le changement climatique a été à l'avant de la scène. Plus récemment, la pollution de l'air est devenue la première préoccupation en matière d'environnement pour le grand public, partout dans le monde, compte tenu de ses impacts sanitaires, économiques et environnementaux. La pollution atmosphérique et le changement climatique sont les deux faces d'un même problème, avec des problématiques conséquentes et particulièrement marquées dans des villes comme Pékin, Buenos Aires, Hanoï ou encore Téhéran, avec lesquelles

Airparif a des accords de coopération et pour lesquelles la qualité de l'air est un enjeu d'attractivité. Les impacts de cette pollution sur la santé, tant sur les plans respiratoire, cardiovasculaire que cérébral, sont largement documentés depuis longtemps et ne peuvent plus être contestés. Tous ces éléments convergent et amènent de nombreux acteurs à se positionner sur la question : l'amélioration de la qualité de l'air est devenue un sujet incontournable pour des institutions supranationales telles que l'OMS, l'OCDE, ou même l'UNICEF. Les grandes ONG, telles que Greenpeace, sensibilisent également davantage le grand public à ces enjeux. Même constat pour les États : les États-Unis ont par exemple installé des capteurs pour mesurer la qualité de l'air dans leurs ambassades et consulats dans plusieurs pays, afin de pouvoir informer les expatriés américains. Même les agences spatiales s'intéressent au sujet,



Ateliers de formation sur la qualité de l'air organisés par les Académies de Créteil, de Paris et de Versailles

sur le plan de la mesure de la pollution atmosphérique ou en fournissant des données via leurs satellites.

Pour autant, les marges de progression restent importantes : si l'on s'intéresse au cas français, le Rapport sur les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air publié par la Cour des comptes en janvier 2016⁵ constate qu'il n'existe pas en France de politique d'actions clairement structurée en la matière, mais plutôt un empilement de dispositifs hétérogènes et d'applications de directives européennes. Le rapport pointe des incohérences entre budgets, moyens d'actions, visibilité, stratégies, etc. Par exemple, on développe l'usage du diesel et du chauffage au bois via des mesures incitatives alors qu'on connaît leurs effets délétères. Le constat est similaire à l'échelon local : on constate que la qualité de l'air en Ile-de-France s'améliore, toutefois trop de citoyens restent encore régulièrement exposés à des niveaux de pollution qui dépassent les recommandations de l'OMS.

La qualité de l'air intérieur est le parent pauvre de la thématique de la qualité de l'air : le grand public continue de penser que nous sommes protégés de la pollution en restant à l'intérieur de nos bâtiments, alors que l'air intérieur peut être plus pollué qu'à l'extérieur... Ce qui est logique : on ajoute à la pollution extérieure tous les produits utilisés en intérieur comme les produits d'entretiens, sans compter la pollution directement produite par les matériaux de construction, les revêtements ou le mode de chauffage et le mode de vie des ménages. Ce rôle secondaire se retrouve en matière de politiques publiques : les moyens budgétaires pour surveiller la qualité de l'air intérieur sont en baisse, tant au niveau des collectivités qu'au niveau national.

Le « marché de l'air » est émergent et dispose d'une portée mondiale, ce qui incite de nombreux acteurs économiques à investir cette thématique

Quels sont les impacts et les enjeux des nouvelles technologies, en particulier les micro-capteurs ?

K.L. : Le « marché de l'air » est émergent et dispose d'une portée mondiale, ce qui incite de nombreux acteurs économiques à investir cette thématique, et ce d'autant plus que le développement des technologies environnementales, la convergence numérique, l'essor des objets connectés et des acteurs français très actifs sur ces sujets laissent entrevoir de nouvelles opportunités, tant pour la surveillance que pour les actions d'amélioration ou d'information du public. Le principal enjeu en ce qui concerne les nouvelles technologies et les micro-capteurs réside dans le fait que la qualité des données est encore très inégale, et que ces technologies ne sont pas adaptées à tous les usages.

Dans ce contexte, Airparif a monté un Lab⁶ dont Veolia est l'un des partenaires fondateurs : la plateforme AIRLAB, qui propose une démarche d'innovation ouverte et collaborative et qui rassemble entreprises, instituts de recherche, collectivités et État⁷. Cette plateforme vise à stimuler l'innovation et à évaluer l'impact sur la qualité de l'air de nouvelles solutions qui pourraient être mises en œuvre. L'originalité de la démarche repose sur l'évaluation des projets, qui doivent démontrer qu'ils permettent bien une diminution de la pollution tout en préservant le climat. Pour ce faire, Airparif met à disposition son expertise technique et ses outils de surveillance. L'AIRLAB favorise ainsi le développement, l'expérimentation et l'évaluation de solutions en matière de qualité de l'air dans la région Ile-de-France ; et a également pour vocation d'encourager la valorisation de ces savoir-faire au niveau national et international dans les domaines de la logistique urbaine, de la qualité de l'air dans les bâtiments, du mobilier urbain, du chauffage, de l'information des citoyens, de la mobilité ou encore de la participation citoyenne à cet enjeu. En matière de qualité de l'air intérieur, l'AIRLAB héberge un projet porté par les entreprises Veolia et Icade, portant entre autres sur l'utilisation de micro-capteurs qui permettront de mesurer la qualité de l'air et de favoriser le développement de bonnes pratiques voire de nouvelles solutions : ventilation, recyclage de l'air intérieur et mesure des taux d'hygrométrie, de CO₂, de particules fines et de composés organiques volatiles.

Par ailleurs, Airparif vient de lancer, en partenariat avec différents partenaires français et internationaux (dont l'Agence Française de Développement, le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche suisse et l'Organisation mondiale de la météo), la deuxième édition du Challenge « AIRLAB Micro-capteurs 2019⁸ ». L'objectif de ce défi est double puisqu'il permet :

1/ de comparer différents capteurs de qualité de l'air afin d'éclairer, en toute indépendance, les utilisateurs potentiels

6 <http://airlab.trgs.at/fr/decouvrir>

7 Région Ile-de-France, Mairie de Paris, Métropole du Grand Paris, préfecture de région, Ile-de-France mobilités, SNCF Logistics, Air Liquide, Icade, Citelum- groupe EDF - et Engie France réseaux

8 <https://www.airparif.fr/actualite/detail/id/261>

5 <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-politiques-publiques-de-lutte-contre-la-pollution-de-lair>



Expérience sur des micro-captureurs dans le cadre du Challenge « AIRLAB Micro-captureurs 2018 »

entre l'adéquation du produit et les usages envisagés (air extérieur, air intérieur, mobilité...);

2/ de mettre en avant les qualités de ces appareils et les voies d'amélioration afin de favoriser l'innovation voire les ruptures technologiques dans ce domaine et de contribuer au développement du marché.

Le *challenge* permet également aux porteurs de projets et aux entreprises de se positionner vis-à-vis de la concurrence. Airparif cherche à évaluer l'efficacité des micro-captureurs sur de nombreux aspects relatifs au fonctionnement de l'appareil et aux modes d'acquisition des données : les capteurs sont ainsi évalués à l'aide de 46 paramètres différents.

Les micro-captureurs présentent de vrais intérêts et opportunités : ce sont des outils qui permettent notamment d'agir sur la sensibilisation du public et d'engager des changements de comportements. En 2018, plus de 800 jeunes issus de 23 établissements d'Ile-de-France (collèges et lycées), ont travaillé sur la qualité de l'air dans le cadre de l'opération « Prenons notre air en main »⁹, au cours de laquelle des capteurs et un kit pédagogique ont été mis à leur disposition.

En air extérieur en revanche, et surtout en mobilité, de nombreuses questions demeurent pour utiliser des micro-captureurs en complément des dispositifs de mesures officiels, compte tenu de la fiabilité des mesures qui est variable d'un appareil à un autre et dans le temps, selon les polluants, et, selon les composés mesurés, selon la température et l'humidité. Le traitement des données et le développement d'algorithmes de correction de la *data*, qui visent à prendre en compte ces incertitudes de mesure et le calibrage des appareils, est lui aussi un enjeu en soi. Autres questionnements et points de vigilance : la durée de vie de ces capteurs (entre 12 et 18 mois en moyenne voire moins selon les conditions d'utilisation) et l'énergie nécessaire au traitement et au stockage des données recueillies (qui doit être évaluée au regard de la performance environnementale du capteur). Fiabilité, exactitude, ergonomie, coûts, ... sont autant de paramètres qu'Airparif va chercher à évaluer afin de pouvoir délivrer l'information la plus adaptée et présenter des recommandations en fonction de l'usage, des besoins, des moyens et de la spécificité de l'utilisateur.

9 <http://www.drie.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/lyceens-collegiens-prenons-notre-air-en-main-r1538.html>

L'ARCHITECTURE FACE AUX ENJEUX DE QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

Dietmar Feichtinger
Architecte, Feichtinger Architectes



Projet pilote d'extension du lycée français et rénovation Studio Molière, Vienne, Autriche (2016) © Dietmar Feichtinger Architectes

Architecte de bâtiments et d'ouvrages d'art, Dietmar Feichtinger conçoit l'architecture comme un art au service du bien-être. Diplômé de l'université de Graz (Autriche) en 1988, Dietmar Feichtinger travaille en France dès 1989. D'abord chef de projet chez Philippe Chaix et Jean-Paul Morel, il fonde l'agence Dietmar Feichtinger Architectes en 1994. L'agence est à l'origine de nombreux projets primés en France et en Autriche, tels que la passerelle Simone-de-Beauvoir en 2006 (Equerre d'argent mention spéciale ; Prix Mies van der Rohe 2007, nomination ; Footbridge Award), le Groupe scolaire Lucie Aubrac de Nanterre en 2012 (Equerre d'argent, mention spéciale) ou encore La Jetée du Mont-Saint-Michel en 2015 (Equerre d'argent catégorie Ouvrage d'art, Trophées Eiffel d'architecture acier).

Lors de la conception d'un bâtiment, les solutions proposées en matière de qualité de l'air intérieur doivent être adaptées aux différents contextes et usages. Les choix et arbitrages effectués en matière de système de ventilation, de volume et de débit d'air vont fortement dépendre du type de bâtiment dont il est question. Il n'y a pas de réponse toute faite, il est nécessaire d'analyser finement les contraintes et besoins pour proposer des solutions de remédiation correctement dimensionnées.

La qualité de l'air intérieur dépend de très nombreux facteurs. Au-delà des caractéristiques techniques du bâtiment, une amélioration de la qualité de l'air doit également passer par des mesures ambitieuses visant à réduire la pollution extérieure, ainsi que par l'activation de leviers en matière de sensibilisation et de modification des habitudes et des comportements dans l'usage quotidien des bâtiments.

On peut distinguer deux grands défis en matière de qualité de l'air dans les futurs projets de construction : la difficulté de proposer une solution adaptée aux besoins et seuils de confort et de tolérance des différents individus, avec des enjeux en matière de judiciarisation de la qualité de l'air ; et la manière de combiner *high tech* et *low tech* en limitant notre dépendance au tout-électronique. La réflexion autour de ces enjeux ne doit pas cependant conduire à des non-sens architecturaux, comme cela a pu être le cas pour d'autres thématiques liées au bâtiment telles que l'efficacité énergétique. Une ligne de conduite peut porter sur la recherche de la simplicité et de la cohérence : dans tout projet de construction et de rénovation, il faut aller à l'essentiel en privilégiant notamment les matériaux bruts et en respectant la nature des éléments.

Comment la qualité de l'air s'articule-t-elle avec les autres défis posés par un projet d'architecture ?

Dietmar Feichtinger : Dans un projet d'architecture, l'enjeu consiste à parvenir à un équilibre entre différentes contraintes. Un bâtiment doit avant tout répondre à un ou plusieurs usages : habitation, bureau, *open space*, accueil du public... Il doit s'intégrer dans un espace donné, être en cohérence avec son environnement.

Une tendance grandissante ces dernières années consiste à donner une place démesurée à la performance énergétique et à l'isolation thermique. Le raisonnement initial est bon, car des erreurs ont été faites par le passé en utilisant des matériaux avec une forte empreinte environnementale ou ne prenant pas suffisamment en compte la question énergétique. Mais on arrive à l'excès inverse : dans le secteur public, les maîtres d'ouvrages demandent des immeubles à énergie positive, c'est-à-dire des immeubles qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment... mais quel est l'intérêt de faire des « bâtiments piles » ? Vouloir trop accentuer la performance énergétique peut nuire au confort et à l'usage des occupants (par exemple en réduisant fortement l'éclairage naturel du bâtiment). Autre exemple : pour des raisons liées à des critères HQE¹, il peut arriver d'envisager de placer l'entrée d'un bâtiment sur la façade sud pour limiter les déperditions énergétiques. Mais si la rue se trouve au nord, cette option ne pourra être retenue.

C'est le danger de trop vouloir spécialiser et expertiser la question de la performance énergétique. Cette réflexion en silo peut mener à des situations qui ne font pas sens. La plus-value de l'architecte consiste justement à intégrer l'ensemble des éléments et à proposer une solution cohérente, en adoptant une approche holistique.

L'architecture est régulièrement soumise à des modes et tendances qui, poussées à l'extrême, vont à contre-sens de l'objectif recherché. Il importe ainsi de rester mesuré et d'anticiper les limites. Dans les années 1980 et jusque dans les années 2000, les bâtiments tertiaires de bureaux étaient très énergivores, vitrés et mécanisés, sans aucune marge de manœuvre pour les occupants. Désormais c'est l'inverse : on veut pouvoir ouvrir les fenêtres et revenir à des matériaux qui rassurent, comme le bois. Il faut cependant avoir en tête les prochains défis architecturaux, qui vont vraisemblablement porter sur des immeubles de très grande hauteur (en raison d'une forte pression sur le foncier). Or le bois, qui est un matériau structurel fiable et parfaitement adapté aux habitations classiques, n'a pas une portée très importante et des interrogations demeurent quant à son

La qualité de l'air intérieur dépend de très nombreux facteurs : des matériaux utilisés (aussi bien pour la structure du bâtiment que pour les équipements), du système de ventilation, des pratiques des occupants

comportement sur des structures de grande hauteur (par exemple concernant sa déformation éventuelle).

Il n'y a pas de réponse toute faite, et la qualité de l'air comme les autres sujets doit être examinée au cas par cas, pour proposer une solution adaptée.

Comment pensez-vous la qualité de l'air lorsque vous concevez un projet ? Quels sont les aspects à prendre en compte ? Les critères de décision ?

D. F. : Les solutions proposées en matière de qualité de l'air intérieur doivent être adaptées aux différents contextes et usages. Il y a des lieux qu'on habite, et des lieux qu'on fréquente temporairement. On ne va pas proposer le même système de ventilation dans une salle de spectacle, qui accueille un public nombreux sur des périodes courtes, et dans des bureaux, qui accueillent des employés toute la journée avec un taux d'occupation qui varie continuellement. Dans le premier cas, il faut un système très puissant, capable de délivrer et de filtrer un air de qualité dans des volumes conséquents. Le second cas appelle à une approche sur-mesure, où l'on doit analyser finement l'usage des différentes pièces du bâtiment pour proposer des solutions de remédiation correctement dimensionnées, afin de ne pas générer de surconsommations tout en garantissant une qualité de l'air optimale.

Un exemple d'application intéressant sur lequel nous avons travaillé porte sur la qualité de l'air intérieur dans les écoles. L'enjeu est d'importance, car il a été prouvé que de trop fortes concentrations de polluants (notamment de CO₂), relatifs à une mauvaise ventilation avaient un impact sur les capacités cognitives des enfants. Mais la plupart des solutions actuelles comportent des limites : surconsommations énergétiques, quand les ventilations tournent sans arrêt y compris la nuit et les jours où il n'y a pas classe ; ou dégradation de la qualité de l'air, en raison d'un

manque d'entretien des filtres, qui s'encrassent. À noter que les solutions les plus efficaces vont souvent à l'encontre de l'intuition première du grand public : de nombreux systèmes de ventilation sont cachés par des faux-plafonds, ce qui procure une « illusion du propre ». En réalité, ces systèmes sont de véritables « nids à

bactéries et poussière », difficiles d'accès et difficiles à entretenir. Il vaut donc mieux, selon nous, laisser les gaines apparentes pour faciliter l'entretien.

Pour en revenir aux écoles, dans le cadre d'un projet pilote nous avons proposé une solution hybride, qui combine une solution technologique de pointe (via un système de ventilation à double flux automatisé décliné à l'échelle de chaque salle de classe) avec la possibilité pour les enseignants d'ouvrir, en cas de besoin, une fenêtre sur l'extérieur. Il y a donc deux partis pris forts : 1/ on traite chaque salle de façon individuelle, avec un système de ventilation spécifiquement dimensionné et 2/ on automatise une partie du système de ventilation tout en laissant la place à l'intervention humaine.

¹ Un bâtiment certifié HQE (Haute Qualité Environnementale) intègre des critères d'exigence environnementaux dès le projet de construction ou de réhabilitation. HQE n'est pas à proprement parler un label répondant à une réglementation, mais une démarche qualité basée sur un cadre de référence. Établie en 2002 par l'association HQE qui en gère la marque déposée, la démarche HQE™ évolue graduellement sous forme de référentiels réactualisés. En phase avec les principes de la construction durable (ou écoconstruction), un bâtiment HQE doit garantir une qualité de vie optimale à ses occupants, tout en respectant l'environnement et en assurant un haut niveau de performance économique et énergétique.



Projet pilote d'extension du lycée français et rénovation Studio Molière, Vienne, Autriche (2016) © Dietmar Feichtinger Architectes

Comment améliorer la qualité de l'air dans un bâtiment ?

D. F. : C'est une vaste question.... La qualité de l'air intérieur dépend de très nombreux facteurs : des matériaux utilisés (aussi bien pour la structure du bâtiment que pour les équipements), du système de ventilation, des pratiques des occupants... et surtout, il ne faut pas oublier que la qualité de l'air intérieur est très dépendante de la qualité de l'air extérieur ! C'est un facteur central.

Alors le meilleur levier d'amélioration de la qualité de l'air intérieur serait l'amélioration de la qualité de l'air extérieur ?

D. F. : Ce qui est sûr, c'est qu'une amélioration de la qualité de l'air doit passer par des mesures ambitieuses pour réduire la pollution extérieure. Je pense qu'il faut rattacher ce sujet à une réflexion générale sur ce que doit être la ville de demain, en favorisant des initiatives telles que celle de Bratislava, capitale de la Slovaquie, ville de taille moyenne (environ 420 000 habitants) qui a prohibé l'usage des voitures en centre-ville. Mais cela demande du courage politique.

Il faut aussi prendre en compte l'usage [...] Il y a des leviers à activer en matière de sensibilisation et de modification des habitudes et des comportements

Si l'on reste à l'échelle du bâtiment, il faut bien se rendre compte que tout l'enjeu ne réside pas uniquement dans la phase de conception : il faut aussi prendre en compte l'usage. Vous pouvez avoir un bâtiment extrêmement bien pensé et construit de manière à optimiser la qualité de l'air, si vous utilisez quotidiennement des produits toxiques, par exemple pour le ménage, tous vos efforts seront vains ! Il y a donc des leviers à activer en matière de sensibilisation et de modification des habitudes et des comportements.

Quels sont les prochains défis en matière de qualité de l'air dans les projets de construction ?

D. F. : Le premier défi que je perçois porte sur la sensibilité de plus en plus exacerbée des individus en matière de nuisances, et sur la difficulté de proposer une solution adaptée aux besoins et seuils de confort et de tolérance des uns et des autres.

Certaines personnes vont par exemple être rapidement en situation d'inconfort thermique en cas de ventilation trop puissante ou de fenêtre ouverte, quand d'autres auront une sensation d'oppression si les fenêtres restent fermées. On perçoit la complexité dans le cas où ces deux catégories d'individus doivent partager le même espace. Dans un hôpital sur lequel nous avons travaillé,



Projet pilote d'extension du lycée français et rénovation Studio Molière, Vienne, Autriche (2016) © Dietmar Feichtinger Architectes

la solution a ainsi consisté à proposer des buses individualisées pour chaque patient. Mais il n'est pas possible de proposer ces solutions dans toutes les configurations, et cela a un coût. Cela amène à la question de l'égalité des droits pour respirer un air de qualité, mais aussi à l'enjeu de judiciarisation de la qualité de l'air : dans certaines écoles privées, des parents commencent à ouvrir le sujet de la responsabilité de l'établissement dans l'échec d'un élève à un examen, au prétexte que la qualité de l'air était insuffisante...

Le deuxième sujet porte sur la tendance actuelle à vouloir tout mesurer et maîtriser, avec les dérives que cela peut comporter. En matière de qualité de l'air, cela se reflète dans le développement des capteurs qui permettent de mesurer les taux de polluants présents dans un bâtiment. Ces technologies sont selon moi intéressantes pour identifier des causes de pollution et trouver des solutions. Mais elles ne doivent pas dicter la conduite des occupants ni générer de situations de stress. Imaginez la

[Se pose] la question de l'égalité des droits pour respirer un air de qualité, mais aussi [celle de] la judiciarisation de la qualité de l'air intérieur

situation dans une salle de classe où les enseignants verraient s'allumer régulièrement des lumières rouges indiquant que les seuils de toxicité sont dépassés. Ce serait une source majeure de déconcentration et d'inquiétude, et ce serait complètement contre-productif !

Tout cela nous amène à avoir une réflexion sur la manière de combiner *high tech* et *low tech*, à limiter notre dépendance au tout-électronique. Une ligne de conduite peut porter sur la recherche de la simplicité et de la cohérence. Dans tout projet de construction et de rénovation, il faut aller à l'essentiel en privilégiant notamment les matériaux bruts et en respectant la nature des éléments. Ce concept de simplicité a de nombreux effets positifs : on limite les composants, solvants et peintures toxiques qui dégradent la qualité de l'air et réduisent les performances techniques des matériaux et on facilite les phases de déconstruction et de réemploi, dans une optique de durabilité. C'est un modèle vertueux.

DU CONSTAT À L'ACTION : COMMENT GARANTIR UN AIR DE QUALITÉ DANS UN BÂTIMENT

Sabine Fauquez

Présidente du Pôle de compétence
Air de Veolia et Présidente
Directrice Générale d'OFIS

Frédéric Bouvier

Directeur du Pôle de compétence Air
de Veolia



Les équipes de Recherche & Innovation de Veolia étudient des solutions dédiées à des problématiques spécifiques de la qualité de l'air en partenariat avec des organismes de recherche et institutions de renom

Sabine Fauquez est Présidente du Pôle de compétence Air de Veolia et Présidente Directrice Générale d'OFIS, le bureau d'ingénierie sanitaire de Veolia. Elle a auparavant été Directrice Générale Adjointe d'Endetec, la filiale dédiée aux solutions de *monitoring* environnemental, après avoir exercé pendant plus de dix ans plusieurs fonctions de direction au sein de Veolia Eau. Sabine Fauquez est titulaire d'un Doctorat en Chimie Analytique de l'Université Pierre et Marie Curie - ESPCI et d'un certificat de Management Général du Centre de Perfectionnement des Affaires.

Frédéric Bouvier a rejoint le groupe Veolia pour prendre la direction du Pôle de compétence Air en 2018, et est devenu Directeur Général Adjoint d'OFIS. De 2015 à 2018, il a été Directeur Général de l'association Airparif¹, et a lancé l'Airlab, accélérateur de solutions innovantes pour la qualité de l'air. Auparavant, il a dirigé l'observatoire régional Atmo Rhône-Alpes et le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. Frédéric Bouvier a suivi une formation d'ingénieur chimiste associée à un master en management et administration des entreprises.

1 Association pour la surveillance et l'étude de la pollution atmosphérique de l'Île-de-France.

Du fait de son impact sanitaire majeur, la pollution de l'air est devenue au fil des années un sujet fortement médiatisé et la quasi-totalité des messages portant sur la qualité de l'air sont aujourd'hui alarmistes, voire fatalistes. Pour sortir d'une logique anxiogène et résoudre une grande partie de la problématique, il est nécessaire d'apporter des solutions fiables et durables avec un engagement de résultat, à l'instar de ce qui est réalisé dans le traitement des autres pollutions difficiles (celles de l'eau, des déchets dangereux, des sols...). Il en va de même pour la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments, qui est un enjeu majeur de santé publique puisque nous passons plus de 80 % de notre temps dans des espaces fermés. Cette volonté s'inscrit dans la logique d'« *exposome*² », qui oriente les politiques publiques afin de réduire l'exposition des personnes au quotidien et tout au long de leur vie. Elle répond à une demande sociétale forte, qui privilégie une logique de protection individuelle.

Pour Veolia, garantir un air de qualité dans un bâtiment exige une démarche reposant sur trois approches complémentaires. En premier lieu, il s'agit de poser un diagnostic et d'explicitier les phénomènes de pollution en identifiant la nature de cette pollution permanente et invisible et en évaluant son niveau. C'est le service « *AIR Control* ». Puis il faut traiter cette pollution en mettant en œuvre les techniques adaptées au mode de remédiation nécessaire selon le type de bâtiment. C'est le service « *AIR Performance* ». Enfin, et compte-tenu de l'impact des comportements individuels sur la qualité de l'air, il est essentiel d'associer les différentes parties prenantes pour obtenir des résultats pérennes. C'est le service « *AIR Human* ».

Établissements scolaires, immeubles de bureaux, hôpitaux et résidences de santé, centres commerciaux, hôtels... tous ces lieux de vie sont concernés et devront proposer un air de qualité à leurs occupants. De nouvelles solutions, qui s'appuient sur l'optimisation des installations de traitement de l'air issue du savoir-faire développé pour les blocs opératoires ou les salles blanches ainsi que sur les nouvelles technologies de mesure en continu (permises par le développement de microcapteurs) sont maintenant disponibles. La généralisation de ces solutions s'appuiera sur un double levier. D'un côté, la recherche et développement pour mettre sur le marché des techniques encore plus innovantes couplant qualité de l'air et efficacité énergétique à un coût optimisé. De l'autre, un renforcement de la réglementation pour inciter à une obligation de résultats afin de garantir une bonne qualité de l'air, à l'image des décisions récentes de certains pays.

2 L'exposome est un terme nouveau qui désigne l'intégration de l'ensemble des expositions nocives environnementales, comportementales et professionnelles auquel est soumis un individu tout au long de son existence : ce concept d'exposome permet d'identifier et d'évaluer les risques potentiels pour la santé, pour mieux les prévenir sur le plan individuel et diminuer les dépenses sanitaires sur le plan collectif.

INTRODUCTION

Le monde entier fait face à l'accélération d'une nouvelle pollution, celle de l'air. Elle est devenue le principal risque environnemental mondial et un enjeu de santé publique majeur. Des efforts notables ont été faits pour lutter contre la pollution de l'air mais la tendance reste majoritairement à une aggravation du phénomène et les résultats de ces politiques apparaissent insuffisants. Quelques exemples récents illustrent l'inquiétude des populations qui refusent dorénavant de vivre dans des villes polluées : à New Delhi, des manifestations publiques ont eu lieu fin 2016 contre la lenteur d'intervention du gouvernement face à un nuage de fumée toxique qui a enveloppé la ville pendant une semaine ; en Chine, on compte plus de 500 mobilisations quotidiennes contre la pollution depuis 2015 ; à Bruxelles, des familles ont manifesté pour réclamer davantage d'actions pour réduire la pollution de l'air...

De façon concrète, des solutions existent pour prendre en charge la gestion intégrée complète de la qualité de l'air intérieur des bâtiments des secteurs public et privé

Les autorités commencent à agir à tous les niveaux. À l'échelle internationale, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) élabore actuellement une nouvelle feuille de route visant à renforcer l'action de lutte contre la pollution de l'air et ses causes³. À l'échelle supranationale, des contentieux sont engagés par la Commission Européenne vis-à-vis des pays en infraction pour non-respect des directives sur l'air ambiant. À l'échelle nationale, les réglementations se durcissent. Citons l'exemple de la Chine, où la manipulation des données sur la qualité de l'air est dorénavant pénalisée. De leur côté, les municipalités et les industriels tendent vers une économie plus propre, plus sobre et moins carbonée avec une volonté d'assurer un développement des villes et des industries qui soit compatible avec la préservation de l'environnement.

Veolia développe une expertise permettant d'assurer le bien-être et la santé des citoyens. Sur la qualité de l'air, le savoir-faire existe depuis de nombreuses années, qu'il s'agisse d'éliminer les odeurs des stations d'épuration, de traiter des fumées et de capter des composés organiques volatils issus des activités industrielles, de garantir un air pur dans les salles blanches et blocs opératoires des hôpitaux, ou encore de mener des diagnostics et des audits de qualité de l'air.

Mais il faut aller plus loin. Deux macro-leviers d'action sont à considérer. Le premier porte sur l'éradication des sources émettrices de pollution, avec la réduction en amont des émissions et le développement des métiers de la mesure et de la modélisation de l'air (pour en évaluer les effets). Le second concerne la protection des citoyens dans les lieux de vie, via la promotion de systèmes de ventilation et de filtration, la dépollution de l'air intérieur et la mise en cohérence des réglementations thermiques avec les normes sanitaires.

QUELLES SOLUTIONS POUR AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR ?

En matière de qualité de l'air intérieur, les exigences sont croissantes. C'est notamment le cas en Europe. Sur le plan technique, le renforcement de l'imperméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, corrélé à l'engagement de réduire par deux les consommations énergétiques finales à horizon 2050⁴, implique dorénavant un pilotage précis et performant des installations de ventilation pour maintenir un air intérieur de bonne qualité et éviter les phénomènes de « syndrome du bâtiment malsain »⁵.

Les exigences augmentent également sur le plan sociétal. Les enjeux relatifs à la qualité de l'air occupent une place croissante dans les préoccupations des citoyens et des pouvoirs publics,

comme en témoigne l'étude « La qualité de l'air intérieur » réalisée par le cabinet Elabe en 2019⁶.

Depuis plusieurs années, les équipes de Recherche & Innovation de Veolia étudient et apportent des solutions à trois questions :

- Comment protéger les salariés potentiellement exposés à l'inhalation de polluants atmosphériques ?
- Comment optimiser le pilotage des installations en intégrant la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique ?
- Comment apporter des solutions dédiées à des problématiques spécifiques à la qualité de l'air ?

En partenariat avec des organismes de recherche et institutions de renom en France (Ineris, Anses, Inserm...), plusieurs outils ont été mis au point pour réduire l'exposition aux substances chimiques de nos salariés et de nos clients dans les bureaux, hôpitaux et sites industriels. À l'international (Université de Laval au Québec, Hong Kong University of Science and Technology...), des méthodes ont été définies pour concilier efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur (avec ces aspects chimiques, biologiques ou particuliers) tant lors de la conception que de l'exploitation des équipements de ventilation et de traitement de l'air. Des innovations à l'attention des opérationnels ont également vu le jour, notamment pour la maintenance prévisionnelle des centrales de traitement d'air. Enfin, des études d'efficacité de revêtement antibactérien ont permis d'améliorer les installations existantes, tandis que des outils de surveillance et de modélisation des émissions dans l'air (y compris en termes de nuisance olfactive) ont intégré les solutions de supervision des réseaux d'eau et des équipements associés proposées par Veolia.

3 Voir l'article de Maria Neira « La transition énergétique pour une meilleure qualité de l'air : un enjeu de santé publique ».

4 Conformément à la loi 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

5 Voir l'article de Fabien Squinazi : « Maîtriser la qualité de l'air intérieur pour préserver la santé de ses occupants ».

6 « La qualité de l'air intérieur », étude Elabe pour Veolia réalisée en France, Belgique et dans l'agglomération de Shanghai, juin 2019. Voir l'article correspondant à cette étude dans cette même revue.

DES SOLUTIONS EXISTENT AINSI POUR UNE GESTION INTÉGRÉE COMPLÈTE (CONCEPTION, INSTALLATION, PILOTAGE ET EXPLOITATION) DE LA QUALITÉ DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS, EN SYNERGIE AVEC LES SERVICES ÉNERGÉTIQUES

Ces recherches se traduisent de façon opérationnelle de la manière suivante : le premier axe d'intervention consiste à équiper les bâtiments de capteurs de mesure en continu de la qualité de l'air. L'essor des objets connectés concerne de nombreux domaines environnementaux et la qualité de l'air n'y fait pas exception. On constate ainsi que de plus en plus de capteurs équipent les villes, les bâtiments, les véhicules ou les individus. Se pose cependant la question de savoir ce que valent ces équipements et pour quels usages ils sont le plus adaptés. En l'absence de normes, il est indispensable de faire appel à un organisme expert indépendant pouvant juger de leur fiabilité, d'autant plus que ces équipements serviront au pilotage des centrales de traitement de l'air. Pour cette qualification, nous avons fait appel à l'*Airlab*⁷ qui a réalisé des tests en laboratoire. Nous avons ensuite validé les meilleurs capteurs « *in situ* » dans le cadre de notre partenariat avec le promoteur immobilier Icade et dans les locaux du siège de Veolia, l'immeuble « le V » à Aubervilliers. Les capteurs qualifiés doivent répondre à des critères de coût, de portabilité, d'ergonomie, d'exactitude pour le pilotage de la ventilation ou du recyclage de l'air intérieur et mesurer différents paramètres tels que le taux d'hygrométrie, de CO₂, de particules fines et de composés organiques volatils.

Le second axe concerne la remédiation, avec des solutions de traitement de l'air. L'*Open Innovation* de Veolia a permis d'identifier des pistes de réponse variées, qui vont de systèmes à intégrer dans une centrale de traitement de l'air existante à des boîtiers autonomes devant être disposés dans une pièce pour un traitement local. La sélection d'appareils performants s'effectue au travers de tests pour garantir l'efficacité des systèmes à déployer, tant sur les plans technique, que sanitaire. En effet, comme pour la fiabilité des appareils de mesure, certains rapports⁸ soulignent que les technologies déployées sont souvent mal maîtrisées, avec une efficacité revendiquée peu justifiée. Certains épurateurs mal conçus peuvent même aller jusqu'à dégrader la qualité de l'air intérieur en générant de nouveaux polluants. Des solutions innovantes de ventilation qui permettent d'apporter un air filtré dans les pièces de vie d'un bâtiment, avec des modalités de déploiement simplifiées et compétitives, ont également été identifiées et testées. Ces solutions proposent une approche « inversée » (insufflation d'un air filtré dans les pièces de vie) par rapport au

La généralisation du monitoring dans les bâtiments va permettre de disposer d'une multitude de données sur l'air intérieur et de développer des nouvelles connaissances pour guider les futures règles de conception et d'exploitation des bâtiments

traitement d'extraction « simple flux » habituel, permettant ainsi un traitement préalable de l'air extérieur, ce qui est impossible à réaliser en extraction « simple flux ». Elles offrent une alternative efficace et peu onéreuse pour des bâtiments de moyenne taille sans centrale de traitement d'air (petits établissements scolaires par exemple). Ces solutions sont également intéressantes pour les territoires concernés par des enjeux de gaz radon.

La mise en place de tels traitements implique de relever simultanément deux défis, d'une part celui d'améliorer la qualité de l'air de manière significative et pérenne, d'autre part celui de maîtriser les consommations énergétiques liées au poste de ventilation. En effet, la problématique de gestion énergétique est intimement liée à celle de la qualité de l'air. La plupart des projets de performance énergétique actuels ont pour conséquence un renforcement de l'isolation et une diminution du renouvellement de l'air dans les bâtiments, ce qui engendre des risques de confinement et de concentration des polluants dans les espaces intérieurs. C'est pourquoi il est crucial de disposer de la double compétence Air / Énergie pour mettre en œuvre des projets, neufs ou de réhabilitation, permettant de répondre aux enjeux environnementaux et sanitaires des bâtiments.

CANADA, MONTRÉAL - UN AIR SAIN POUR L'HÔPITAL CHUM

Le Centre Hospitalier de l'Université de Montréal, au Canada, est né en 1996 de la fusion de trois établissements. Dans le cadre d'un contrat de performance énergétique, Veolia a été retenu pour accompagner le projet de migration de cet ensemble, dit « CHUM », vers un site unique en 2016. Les questions relatives à la qualité de l'air intérieur ont fait partie intégrante de cette mission, avec des volets de *design*, d'assistance, d'opération et de gestion des risques.

Un travail a été mené en particulier sur les systèmes de récupération de chaleur par échange rotatif (roues thermiques) des centrales de traitement d'air de l'établissement. Intéressants pour leur grande efficacité en matière d'économie d'énergie, ces systèmes peuvent présenter un risque de mélange d'air neuf et d'air rejeté, ce qui questionne leur usage dans des établissements sensibles tels que les hôpitaux. L'étude a permis d'élaborer des recommandations en termes de maintenance préventive et corrective pour prévenir ce risque. Les efforts portent désormais sur les moyens à mettre en place afin d'évaluer en continu le risque microbiologique au niveau de ces systèmes.

⁷ L'*Airlab* est la plateforme d'innovation pour la qualité de l'air initiée par l'association agréée de surveillance de la qualité de l'air Airparif et dont Veolia est membre fondateur. Voir l'article de Karine Léger : « Surveiller, Informer, Comprendre, Innover : le rôle d'Airparif, association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air ».

⁸ Rapport 2017 de l'ANSES « Identification et analyse des différentes techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes ».

FRANCE - UN ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL AMÉLIORÉ POUR LA SOCIÉTÉ GÉNÉRALE

La société OFIS, filiale de Veolia spécialisée en audit de la qualité de l'air intérieur, accompagne depuis plus de dix années le groupe bancaire Société Générale dans l'amélioration de l'environnement de travail de ses salariés. La Société Générale lui a confié le suivi de

la qualité de l'air intérieur de son siège historique et de ses agences parisiennes (30 sites). Grâce au plan d'action mis en œuvre, la Société Générale a pu se conformer aux meilleurs standards de qualité d'air et offrir à ses clients et collaborateurs un confort optimisé.

GARANTIR LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR EST-IL UN PARI IMPOSSIBLE ?

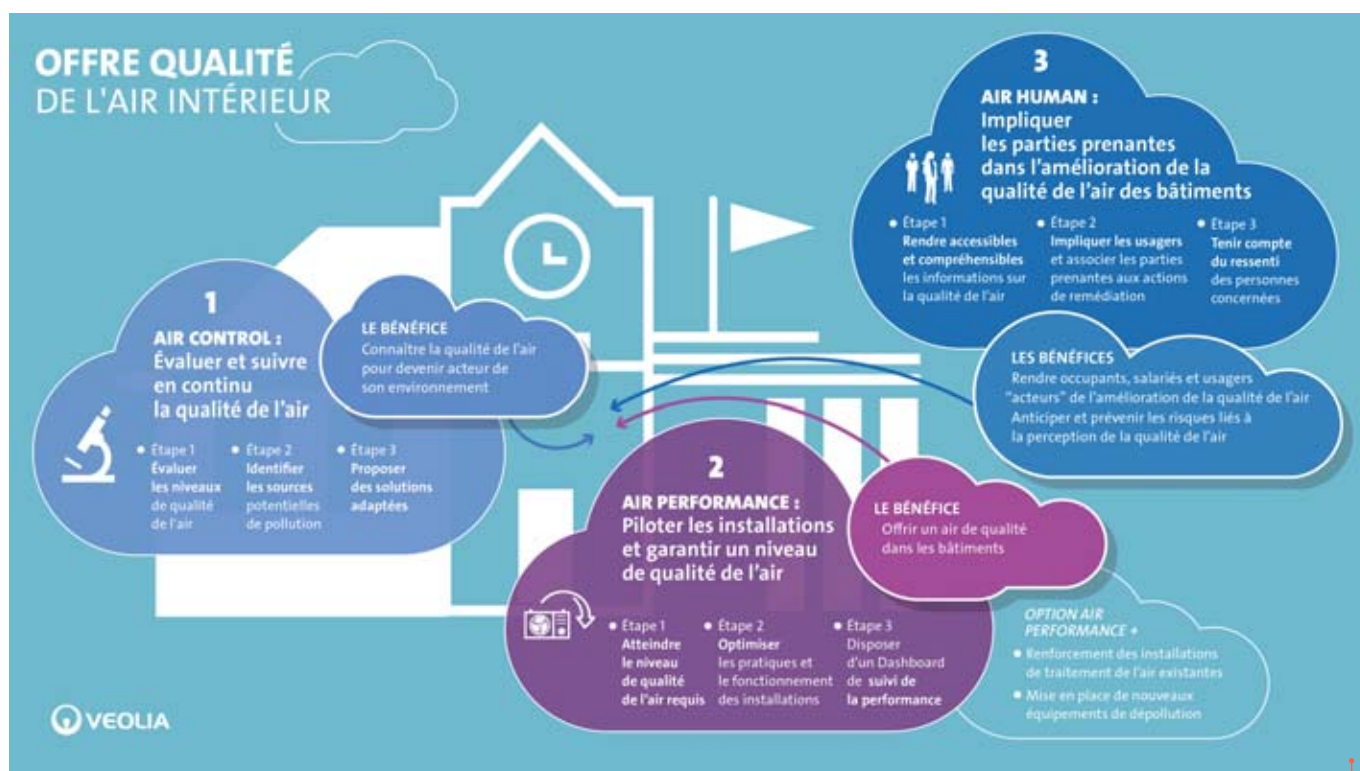
Maîtriser l'exposition aux polluants dans les espaces clos nécessite un engagement sur la qualité de l'air intérieur à respecter. Notre ambition est d'accompagner les gestionnaires de bâtiments pour garantir un air sain, en lien avec une gestion optimisée de l'énergie, afin de procurer plus de bien-être et un meilleur confort aux occupants.

Pour Veolia, garantir un air de qualité repose sur une démarche comportant trois services complémentaires :

- « *AIR Control* » qui couvre le champ de la connaissance, du *monitoring* et de l'audit. Ce service permet d'établir un état des

lieux et de proposer un plan d'actions pour améliorer la qualité de l'air ;

- « *AIR Performance* » qui intègre la gestion d'installations techniques avec une garantie de niveau de qualité de l'air à respecter. Il peut se décliner en « *AIR Performance Plus* », dès lors que des investissements matériels sont nécessaires pour atteindre les objectifs de qualité de l'air souhaités ;
- « *AIR Human* » qui implique les occupants dans l'atteinte des objectifs. Ces derniers deviennent acteurs des solutions et leurs avis sont pris en compte dans les critères de performance.



Graphique 1 - Les trois services « Air Quality Solutions » de Veolia

L'IMPACT D'UNE MAUVAISE QUALITÉ DE L'AIR ÉTANT PLUS IMPORTANT CHEZ LES PERSONNES SENSIBLES ET NOTAMMENT LES ENFANTS⁹, IL CONVIENT D'AGIR EN PRIORITÉ SUR LES ÉTABLISSEMENTS SCOLAIRES

Préserver un air de qualité dans les salles de classes est indispensable pour un meilleur apprentissage et une amélioration de la concentration des enfants. Dans ce contexte, et pour

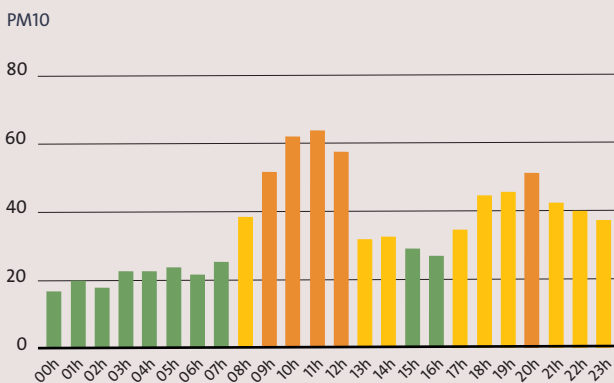
⁹ Un adulte inspire 16 fois par minute contre 40 inspirations minute pour les enfants qui sont donc les populations les plus exposées/sensibles, d'autant qu'un enfant construit son système respiratoire au début de sa vie.

la première fois en France, deux écoles d'une commune en région parisienne (voir encadré) ont été équipées de la nouvelle solution de Veolia (*monitoring*, traitement et sensibilisation) : depuis la rentrée 2019, près de 600 élèves et professeurs respirent ainsi chaque jour un air dont la qualité est garantie (respect des seuils recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé). Les fréquents dépassements de concentration de particules¹⁰, de taux de Composés Organiques Volatils présents dans l'air, ou du niveau de confinement que l'on détecte habituellement dans la majorité des établissements scolaires ne sont plus observés.

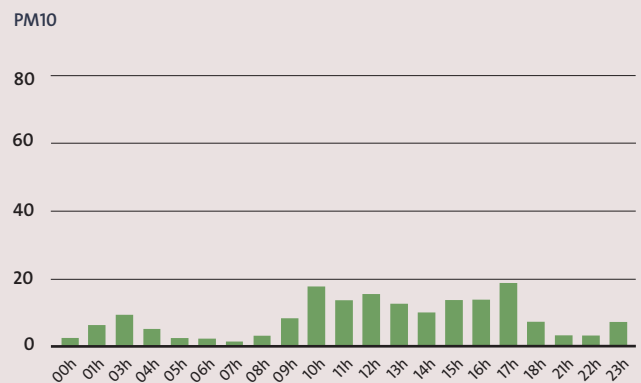
¹⁰ Sur 300 écoles françaises représentatives des écoles en France, 93 % des classes présentent des concentrations en particules fines (PM_{2,5}) supérieures à la valeur guide de l'OMS - Étude 2013-2017 de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur.

Mesure des concentrations en particules avant et après la mise en œuvre de *Air Performance*

17/09/2019 00 h 00 au 17/09/2019 23 h 59



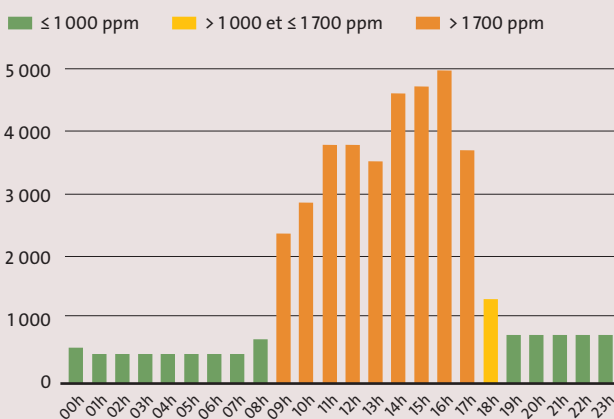
04/11/2019 00 h 00 au 04/11/2019 23 h 59



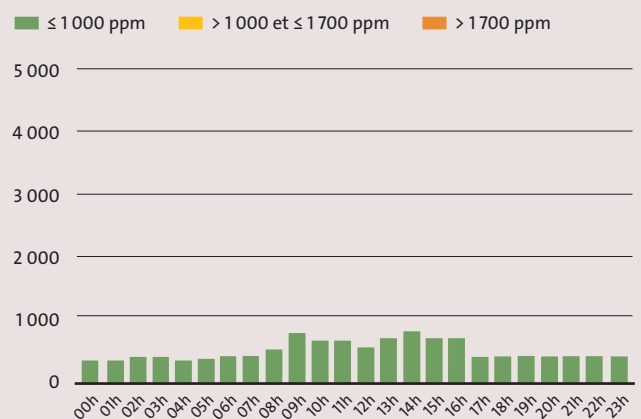
Graphique 2

Mesure des concentrations en CO₂ avant et après la mise en œuvre de *Air Performance*

08/10/2019 00 h 00 au 08/10/2019 23 h 59



19/11/2019 00 h 00 au 19/11/2019 23 h 59



Graphique 3

Cette problématique majeure se retrouve dans de nombreux autres pays, comme l'illustre l'article des équipes de la République Tchèque présenté en exemple du présent article.



Centrale de traitement d'air double flux semi-centralisée, école élémentaire La Fontaine (Le Raincy), classe n°3 - © Jade Lachery

FRANCE, LE RAINCY : LA QUALITÉ DE L'AIR GARANTIE DANS DES ÉCOLES

À l'occasion de la Journée Nationale de la Qualité de l'Air en France le 18 septembre 2019, la commune du Raincy, qui compte 14 000 habitants en région parisienne, a annoncé le lancement d'une opération visant à assurer une qualité de l'air optimale pour ses écoles.

Pour Jean-Michel Genestier, Maire de la ville du Raincy, il était « primordial de mieux connaître la qualité de l'air grâce aux capteurs installés dans les classes pour garantir un bon air aux 569 écoliers des écoles concernées ».

L'opération, menée dans deux écoles élémentaires depuis la conception jusqu'à la réalisation, démontre concrètement les trois niveaux de services (AIR Control, AIR Performance, AIR Human) proposés par Veolia.

Après avoir effectué un audit des bâtiments (pour identifier les éventuelles sources polluantes présentes dans les classes), des capteurs sélectionnés pour leur fiabilité ont été installés dans chaque classe dans l'objectif de suivre en continu la qualité de l'air intérieur en mesurant plusieurs paramètres, dont le CO₂ et les particules fines. L'objectif consistait à identifier les seuils allant au-delà de la réglementation en vigueur.

Afin de garantir la qualité de l'air respiré par les enfants, des solutions de filtration et de renouvellement d'air ont également été déployées. Elles sont pilotées de façon à pouvoir maintenir les différents paramètres de qualité de l'air en

deçà des valeurs seuils tout en optimisant les consommations énergétiques (le débit de ventilation est régulé en fonction des concentrations mesurées en temps réel dans chaque classe).

Dans mon école, c'est le Bon'AIR !

Parce que la garantie de la qualité de l'air ne se limite pas seulement à un projet d'ordre technique, les experts délivrent conseils et bonnes pratiques à l'aide d'outils pédagogiques, afin de rendre les élèves acteurs de la qualité de l'air qu'ils respirent à l'école mais aussi chez eux.

Enfin, en réponse à la demande d'information émise par les élus et les citoyens sur la qualité de l'air respiré par les écoliers, un tableau de bord « qualité de l'air intérieur » synthétisant les différents niveaux de qualité d'air au sein de chaque classe a été élaboré. Des données sont partagées avec les enseignants et les parents d'élèves, afin que tous soient informés et sensibilisés en toute transparence sur l'évolution positive de la qualité de l'air.

La solution déployée dans le cas des écoles de la ville du Raincy est transposable aux autres écoles de France qui, pour 93 % d'entre elles, ont aujourd'hui des concentrations élevées en particules fines (supérieures aux recommandations de l'OMS) et pour 41 % un indice de confinement en CO₂ très élevé ou extrême.

LES BÂTIMENTS AUSSI PEUVENT ÊTRE MALADES : LE CAS DES ÉCOLES EN RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

Pendant des années, les bâtiments ont été rénovés pour être mieux isolés, par exemple en remplaçant les châssis de fenêtres en bois par des produits en PVC. Pour réaliser des économies de chauffage, nous avons créé un autre problème : celui de la qualité de l'air dans les bâtiments très étanches. Cette situation concerne plus de 60 % des écoles en République tchèque.

PROBLÈMES DE VENTILATION

Le Fonds d'État pour l'environnement accorde des subventions pour l'isolation des écoles. « Nous avons soutenu 1200 écoles et jardins d'enfants à hauteur de six milliards de couronnes¹⁴ », explique le porte-parole du Fonds, précisant que les projets les plus récents incluent la climatisation.

Toutefois, les directeurs d'école se plaignent maintenant du fait que les économies d'énergie réalisées sont inférieures aux coûts induits par la mauvaise qualité de l'air intérieur dans les bâtiments trop étanches, car il est alors nécessaire de ventiler et de climatiser régulièrement.

« Le problème est aigu, surtout pendant les mois d'hiver où l'on ne peut pas ouvrir les fenêtres aussi souvent pour ventiler. Dans les salles de classe, les enfants assis près des fenêtres ont très vite froid et il faut refermer avant que les autres enfants reçoivent une bouffée d'air frais », explique le directeur d'une école de grand effectif à Prague.

LES EFFETS NÉGATIFS D'UNE FORTE CONCENTRATION DE CO₂

Les concentrations élevées de dioxyde de carbone affectent à la fois les étudiants et les enseignants : fatigue et baisse de concentration sont constatées.

Le dioxyde de carbone, un gaz incolore et inodore, est un composant naturel de l'air ambiant.

Les organismes vivants le produisent comme un métabolite de la respiration cellulaire.

En concentrations plus élevées (>1000 ppm), il affecte la santé humaine, entraînant des maux de tête, de la fatigue et une baisse de l'attention.

La concentration de CO₂ peut atteindre environ 1500 ppm dans une salle de classe pendant une leçon, simplement à cause de la respiration des élèves et des enseignants. Après 90 minutes, elle peut s'élever à 2700 ppm. La fatigue et le manque d'attention deviennent des obstacles à l'enseignement et à l'apprentissage.

« Notre école a fait l'objet d'une rénovation il y a quelques années : nous avons amélioré l'isolation et remplacé les fenêtres. Depuis, l'air des salles de

classe se dégrade beaucoup plus rapidement et nous devons aérer plus souvent. Les enfants sont fatigués et somnolents. Certains enseignants se plaignent aussi d'une plus grande fatigue », poursuit le directeur de l'école.

Avec des fenêtres fermées dans les salles de classe pleines, les enfants sont plus souvent malades. En effet, les infections se transmettent plus facilement dans des environnements où le renouvellement de l'air est insuffisant. Comme il peut y avoir jusqu'à trente enfants dans une salle de classe, le risque d'infection est assez élevé. « Avec le temps, nous avons réalisé que la fatigue n'était pas le principal problème. Nous ne l'avons pas tout de suite remarqué, mais le taux de maladie chez les élèves et les enseignants a augmenté de manière significative. »

DIFFICILE DE TROUVER DES SOLUTIONS

La pollution de la qualité de l'air intérieur est difficile à déceler par nos simples sens. C'est pourquoi les bâtiments récents sont équipés de capteurs qui mesurent la qualité de l'environnement intérieur. Les capteurs mesurent la température de l'air, l'humidité et le taux de concentration du CO₂. En fonction des résultats, des actions sont entreprises pour aérer, notamment en utilisant un système automatique de contrôle du renouvellement de l'air.

Il s'avère que le fait d'aérer manuellement, même régulièrement, ne suffit pas à maintenir de faibles niveaux de concentration en CO₂ dans certains bâtiments. Les systèmes de ventilation automatique sont actuellement la seule solution vraiment efficace pour faire baisser de façon durable les concentrations de CO₂ sans intervention des utilisateurs.

« Après avoir installé les détecteurs, nous avons constaté que même le fait d'ouvrir régulièrement la fenêtre ne suffisait pas. Certains disent que les fenêtres sont trop étroites, explique l'un des enseignants. Nous nous penchons actuellement sur ce problème. Il semblerait que l'installation d'un système de ventilation active soit la meilleure solution. Nous étudions actuellement des propositions en vue d'équiper les salles de classe. »

Les pertes thermiques dues à la ventilation peuvent être réduites grâce à la récupération. La ventilation contrôlée assure un apport constant d'air frais et l'extraction de l'air intérieur détérioré, quelles que soient les conditions ambiantes et sans nécessiter l'intervention de l'utilisateur. La possibilité de respirer un air sain est à ce prix.

¹⁴ Près de 240 millions d'euros.

DES SYSTÈMES INTELLIGENTS POUR UN AIR INTÉRIEUR DE QUALITÉ

Interview de Martin Lang, directeur exécutif de LG Systems

La qualité de l'air dans les habitations et les écoles est un sujet de premier plan aujourd'hui. Quelles sont les conséquences d'une mauvaise qualité de l'air intérieur ? Quelles sont les solutions ? Nous avons interrogé Martin Lang, de LG Systems Czech Republic, qui fait partie du Groupe Veolia.

La dégradation de la qualité de l'air est un sujet récurrent. Que se passe-t-il ?

Martin Lang : Autrefois, les bâtiments étaient naturellement ventilés : la maçonnerie était poreuse et les fenêtres et portes n'étaient pas étanches. À la fin des années 1990, des travaux d'isolation à grande échelle ont été menés en République tchèque, soutenus par des subventions. Les procédés de construction ont été considérablement modifiés et la fabrication des fenêtres a connu de grands progrès. Aujourd'hui, presque tous les bâtiments en République tchèque sont isolés et équipés de nouvelles fenêtres. Il n'y a plus d'échange d'air naturel : en hiver, la condensation se forme sur les fenêtres et les moisissures commencent à se développer. L'humidité n'est pas le seul problème. Il y a aussi une forte concentration de dioxyde de carbone à l'intérieur : l'air devient étouffant et nous manquons d'oxygène.

C'est un problème majeur dans les bâtiments collectifs, comme les écoles, les hôpitaux, les cinémas ou les théâtres. Dans les nouveaux projets de construction, on résout ce problème en utilisant des systèmes de récupération de chaleur, mais les bâtiments anciens n'en ont pas.

Quels sont les effets d'un niveau élevé de CO₂ ?

M. L. : La baisse de l'immunité : dans les bâtiments scolaires isolés, le taux de maladie est deux fois plus élevé qu'auparavant. De plus, s'il n'y a pas assez d'oxygène, le corps essaie de maintenir ses fonctions de base, au détriment de l'activité cérébrale. Il en résulte de la fatigue, de la somnolence et un rendement scolaire plus faible, ce qui est particulièrement problématique pour les écoles.

Des études montrent que si une salle de classe est brièvement aérée, au bout de dix minutes les niveaux de CO₂ sont de nouveau trop élevés... On ne peut pas régler ce problème en laissant les fenêtres ouvertes en permanence : trop de pertes de chaleur et parfois trop de bruit, ce qui complique l'enseignement.

Quelle est la proportion d'écoles affectées ?

M. L. : La majorité des écoles tchèques est affectée. Ces écoles ont été isolées sans système de récupération de chaleur.

Qu'en est-il des autres pays ?

M. L. : La situation est un peu la même. Dans les années 1990, toute l'Europe a commencé à parler de réchauffement climatique et les mouvements écologiques ont pris de l'ampleur. Cela a révolutionné la construction, favorisant les bâtiments à faible consommation d'énergie. Aujourd'hui, les autres pays sont confrontés aux mêmes problèmes que nous : beaucoup de bâtiments isolés il y a longtemps n'ont pas été équipés de système de récupération de chaleur.

Quelle solution ?

M. L. : Notre entreprise a développé un système intelligent pour optimiser le fonctionnement des habitations. Au cœur du système de contrôle se trouve un microordinateur qui reçoit des informations de la part de capteurs, enregistrant entre autres la qualité de l'air, les niveaux de CO₂ et l'humidité. Si les limites sont dépassées, le système prévient l'utilisateur

pour qu'il aère. Le système peut aussi déterminer si l'utilisateur prend une douche, auquel cas l'humidité est normale, ou s'il fait humide à plus long terme et qu'il faut aérer. Les fenêtres intelligentes à récupération de chaleur améliorent aussi considérablement la qualité de l'air intérieur. En revanche, les fenêtres doivent généralement être ouvertes et fermées manuellement. L'ouverture et la fermeture automatiques sont possibles, mais elles ne sont pas toujours souhaitables pour les utilisateurs. Si la famille regarde la télévision, il n'est pas forcément agréable que la fenêtre s'ouvre dans cette pièce, ce qui peut causer des dérangements, comme des courants d'air ou du bruit.

Votre système a-t-il d'autres fonctionnalités ?

M. L. : Notre système signifie que toute la maison est intelligente et que les utilisateurs peuvent accéder à toutes les ouvertures depuis leur ordinateur ou leur téléphone portable. Le système peut contrôler les thermostats du chauffage central, afin de trouver la température la plus confortable. Le chauffage peut aussi être allumé à distance si les utilisateurs rentrent de weekend, par exemple. Le système peut allumer et éteindre les lumières et les prises, en utilisant les installations existantes, sans qu'il soit nécessaire de démonter ou remplacer les interrupteurs. Si vous partez en vacances, notre système intelligent peut simuler les mouvements dans votre maison en allumant et en éteignant les lumières et en ouvrant et fermant les stores, et il peut couper la majorité des circuits électriques pour éviter un accident. Nous prévoyons d'ajouter un réfrigérateur ou un garde-manger intelligent capable de faire des commandes alimentaires.

Notre système intelligent vous permet également de vérifier en ligne votre consommation d'eau, d'énergie et de chaleur. Il indique votre consommation en unités standard et en couronnes (monnaie locale de la République tchèque), affiche le montant prévisionnel de votre facture annuelle et souligne également les éventuelles anomalies. Les utilisateurs peuvent ainsi vérifier à tout moment si leurs mensualités sont suffisantes, plutôt que de s'inquiéter en fin d'année de recevoir des factures de chauffage, d'eau et d'électricité trop élevées.

Pouvez-vous en dire plus sur les fenêtres intelligentes ?

M. L. : Nous proposons actuellement une fenêtre intelligente composée d'un store intelligent et d'un récupérateur de chaleur intégré au cadre. Elle est particulièrement adaptée aux habitations et toutes les fenêtres n'ont pas besoin d'être équipées d'un récupérateur : le nombre d'unités dépend de la taille de la pièce à ventiler.

Avez-vous d'autres projets ?

M. L. : Nous travaillons d'arrache-pied à la prochaine révolution dans le domaine des fenêtres intelligentes. Nous voulons les équiper de pompes à chaleur pour faciliter le refroidissement et le chauffage. Pour cela, nous utilisons une fenêtre à double vitrage classique et y installons un troisième volet, avec un store intelligent intégré et un récupérateur de chaleur. Il y a des aérations sur les bords du cadre et des espaces vides d'une quinzaine de centimètres de long dans les murs. Notre fenêtre intelligente unique permet d'optimiser la qualité de l'air intérieur sans avoir à ouvrir ou à fermer, simplement en ajustant ces ouvertures et ces poches d'air. Elle trouve son application dans les appartements, les maisons, les écoles, les jardins d'enfants, les établissements médicaux, les immeubles de bureaux et autres locaux.



MÊME DANS UN BÂTIMENT NEUF INTÉGRANT DES CRITÈRES DE PRÉSERVATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR, UN AIR SAIN RESTE UN ENJEU POUR L'EXPLOITANT

Pour notre nouveau siège, l'immeuble « le V », notre objectif est d'atteindre l'excellence sanitaire et environnementale. À ce titre, assurer une bonne qualité de l'air intérieur à tous les usagers du bâtiment a été l'un des enjeux majeurs identifiés dès la phase de construction. La réalisation du bâtiment a répondu aux exigences des certifications HQE® *Excellent* et BREEAM® *Very Good*, intégrant des cibles ambitieuses pour la préservation de la qualité de l'air intérieur. Le choix de matériaux adaptés pour limiter les émissions en composés chimiques, la sélection de systèmes de traitement d'air performants et l'implantation de plus de cent capteurs de mesure du CO₂ ont contribué au bon classement du bâtiment. Aujourd'hui, en complément des audits de qualité de l'air annuels, le bâtiment est couvert par

le service « *AIR Performance* » et la qualité de l'air est pilotée avec une garantie de résultat. Cette nouvelle exigence met en évidence des variations qui n'étaient jusqu'à présent pas visibles et qui pouvaient affecter notablement le confort des occupants. A titre d'exemple, les modifications de l'usage des locaux (construction d'une nouvelle cloison, modification d'un *open-space*, etc.) pouvaient avoir des conséquences sur la qualité de l'air qui étaient mal compensées en l'absence d'ajustement du système de ventilation. De la même façon, l'ajout d'un *monitoring* en continu (près de 40 capteurs supplémentaires ont été installés dans l'immeuble pour mesurer en continu les particules fines, le CO₂ et les composés organiques volatils), permet de mieux comprendre la variation des différents paramètres de qualité de l'air et d'adapter en conséquence le pilotage des centrales de traitement de l'air.

Cette approche est déployée ailleurs dans le monde, comme l'illustre l'exemple de nos collègues en Chine.

VEOLIA EN CHINE

En Chine, les entreprises qui sont en mesure de proposer des solutions complètes de suivi (ex. : suivi en ligne de plusieurs paramètres de qualité de l'air avec suffisamment de précision et la possibilité d'exploiter et traiter les données de façon adéquate) devront présenter un avantage concurrentiel à l'avenir.

Anticipant l'accroissement des besoins dans le domaine de la qualité de l'air intérieur (QAI) et des ventes d'offres de services énergétiques aux bâtiments, Veolia a décidé de renforcer son portefeuille de services en Chine.

Pour montrer sa légitimité à opérer en Chine, Veolia est devenu le principal actionnaire de DasLinkin, une société locale spécialisée dans les services d'électricité. Ce partenariat permettra de développer le réseau et la présence géographique de Veolia ainsi que son expertise technique dans les services d'électricité haute tension et basse tension.

Linkin by Veolia a développé un projet pilote de qualité de l'air intérieur pour l'un de nos contrats phares, la concession d'eau de Shanghai Pudong :

- L'équipe a commencé par réaliser un audit de la qualité de l'air intérieur dans l'immeuble de bureaux et a installé 11 capteurs dans différentes zones du bâtiment¹¹ afin de suivre cinq indicateurs via une plateforme de surveillance. En fonction de la température, du niveau d'humidité et de la concentration de CO₂, de PM_{2,5} et de COV, la plateforme fournit automatiquement des directives aux utilisateurs finaux.
- Dans le même temps, des actions proactives ont été menées pour améliorer la qualité de l'air. Par exemple, l'équipe locale a permis une mise à niveau de l'unité de traitement d'air pour améliorer les niveaux de PM_{2,5} et de COV. Des filtres à air mobiles intelligents ont également été installés. Ceux-ci peuvent se déplacer automatiquement dans les bureaux en fonction des besoins en matière de qualité de l'air.
- Enfin, la consommation d'électricité a été intégrée à la plateforme de suivi, afin de trouver des moyens de réduire la consommation d'énergie.

Dans le prolongement de ce projet, l'ambition est de permettre l'analyse et la remédiation de la pollution de l'air.

¹¹ Ex. Dans le hall d'accueil, la salle de réunion, la salle de contrôle, les openspaces, l'office et aux abords du bâtiment

La double action consistant à révéler le niveau de qualité de l'air intérieur par la mesure en continu tout en proposant dans le même temps des solutions pour l'améliorer et la préserver, permet d'accompagner les gestionnaires qui, auparavant hésitants vis-à-vis de cette problématique complexe et anxiogène, pouvaient être tentés de la minimiser. C'est la raison pour laquelle la démarche débute le plus souvent par le service « AIR Control ». Diagnostics initiaux et *monitoring* en continu permettent de disposer d'une vision détaillée et dynamique de l'état d'un bâtiment, créant ainsi une « empreinte de la qualité de l'air intérieur ». Dès lors, il devient plus aisé d'apporter des solutions adaptées aux problèmes rencontrés.

Ce type de solution s'adapte à une grande diversité de bâtiments : hôtels, hôpitaux, gymnases, centres commerciaux, piscines, etc. Nos travaux se poursuivent pour être en mesure de traiter des pollutions spécifiques et complexes au sein d'atmosphères particulières, comme par exemple les espaces souterrains (métros par exemple).

Le développement du marché devrait aboutir à ce que les prix des équipements de mesure et de traitement deviennent encore plus compétitifs, avec des volumes suffisants pour accélérer une démocratisation du traitement de la qualité de l'air intérieur pour la santé de tous. Comme l'a récemment publié l'Urban Lab¹² de la Ville de Paris suite à un programme d'expérimentations dédiées à la qualité de l'air, l'outil réglementaire sera un levier efficace pour soutenir le développement de ces solutions. L'exemple très récent de la Belgique¹³, qui a basculé d'une démarche de moyens à une obligation de résultats et de garantie de la qualité de l'air intérieur, ouvre la voie à des réglementations plus contraignantes et plus protectrices de la santé des populations.

CONCLUSION

L'air est un bien commun et une ressource vitale pour chacun d'entre nous (nous en respirons 15 000 litres chaque jour). Dès aujourd'hui, il est possible de garantir un air intérieur de qualité dans les bâtiments et ainsi réduire l'impact sanitaire majeur de l'air pollué. Les principaux défis pour les prochaines années concernent la capacité à déployer largement et rapidement les solutions développées et à optimiser le coût du mètre cube d'air traité. Au-delà, la généralisation du *monitoring* dans les bâtiments va permettre de disposer d'une multitude de données sur l'air intérieur et de développer des nouvelles connaissances pour guider les futures règles de conception et d'exploitation des bâtiments.

¹² Laboratoire d'expérimentation urbaine de Paris&Co.

¹³ Arrêté royal du 2 mai 2019 modifiant le code du bien-être au travail en matière de qualité de l'air intérieur dans les locaux de travail

PURIFIER L'AIR INTÉRIEUR GRÂCE AUX PLANTES ET BACTÉRIES :

les expériences de la NASA et du projet Biosphere 2

Bill C. Wolverton,
Chercheur, NASA
et Wolverton
Environmental Services

Mark Nelson,
Chercheur, Institute of Ecotechnics,
Space Biosphere Ventures (Biosphere 2)
et Wastewater Gardens International



Le Biohome, un bâtiment scellé créé par la NASA à la fin des années 1980 dans le but d'étudier les vertus dépolluantes des plantes vertes.
©Bill Wolverton

Bill C. Wolverton est un scientifique américain entré à la NASA en 1971 en tant que Responsable du Laboratoire de recherche environnementale au Mississippi Test Facility (aujourd'hui connu sous le nom de John C. Stennis Space Center). Il y a principalement étudié la phytoremédiation dans les espaces confinés, l'application des biotechnologies au traitement de l'eau, dérivée du traitement de la pollution terrestre. Dès 1989, il a étudié à la NASA la capacité des plantes à absorber plusieurs composés chimiques. Après la publication du rapport d'étude de la NASA sur la qualité de l'air en 1990, il a lancé sa propre structure de recherche, Wolverton Environmental Services, qui étudie encore aujourd'hui la phytoremédiation.

Mark Nelson est un scientifique américain, anciennement Directeur des applications spatiales et environnementales de Space Biospheres Ventures, à l'origine de la création et de l'exploitation Biosphere 2, une installation de recherche en sciences sur le système terrestre, basée à Oracle, en Arizona. Il a été l'un des fondateurs de l'Institute of Ecotechnics, un organisme à but non lucratif américano-britannique, qui fournit une assistance technique à plusieurs projets de démonstration portant sur des biomes difficiles à travers le monde. Il est à la tête de Wastewater Gardens International qui a mis en place dans 14 pays des zones humides écologiques artificielles, une technologie utilisée dans Biosphère 2.

La phytoremédiation est le processus par lequel les plantes et les bactéries de leurs systèmes racinaires éliminent les polluants de l'air et de l'eau. Ces propriétés purifiantes ont été découvertes dans le cadre d'expériences sur les vols spatiaux habités : dans les années 1980, des scientifiques du John C. Stennis Space Center ont révélé la capacité des plantes d'intérieur à éliminer les composés organiques volatils (COV) présents dans les espaces étanches. D'autres recherches, comme la construction de l'installation Biohome, ont débouché sur certaines avancées scientifiques et permis de mieux comprendre comment optimiser la capacité des plantes d'intérieur à purifier l'air. L'expérience a montré que les plantes d'intérieur étaient capables d'éliminer les émanations permanentes de COV au sein d'un système clos, grâce à l'action combinée des feuilles et des bactéries des racines (par métabolisation, translocation et/ou transpiration).

Parallèlement, les expériences menées par Mark Nelson sur Biosphere 2 ont démontré qu'il était possible d'assurer la biofiltration de l'air tout en maintenant un niveau élevé de productivité des cultures et de fertilité des sols. Les recherches de Biosphere 2 sur la biofiltration plantes/terre montrent que l'efficacité à éliminer les traces de gaz dépend de la présence, dans la terre, d'un microbiote capable de les métaboliser.

Ces deux expériences montrent que la biofiltration végétale est une technologie prometteuse, qui pourrait contribuer à résoudre des problèmes posés par la pollution atmosphérique dans le monde. Ces solutions ont un vaste champ d'application et, par rapport aux technologies concurrentes, sont beaucoup plus avantageuses en termes d'investissement et de coûts d'exploitation. Il serait donc judicieux de les appliquer beaucoup plus largement, en particulier à l'intérieur des bâtiments.

INTRODUCTION

La Terre est une planète dynamique et vivante, façonnée par une biosphère en constante évolution. L'interaction des plantes et des bactéries joue un rôle essentiel à l'équilibre des écosystèmes de la Terre. De manière imagée, les plantes et les bactéries sont en quelque sorte ses poumons et ses reins. Ils filtrent et éliminent en permanence les déchets. Et même si nous comprenons bien ces fonctions dans la nature, nous avons des difficultés à envisager ces mêmes processus filtrant l'air et l'eau de nos espaces construits.

Paradoxalement, alors que les humains ont soif de nature, beaucoup passent jusqu'à 90 % de leur temps en intérieur, où la qualité de l'air est loin d'être idéale et, parfois, plus polluée qu'à l'extérieur. Nous avons maintenant introduit plus de 85 000 produits chimiques synthétiques dans l'environnement, mais aussi de nombreuses toxines dégagées par les gaz qui sont piégées dans nos bâtiments. Les matériaux synthétiques, les équipements et les appareils numériques libèrent également des gaz à l'état de traces. D'autant qu'aujourd'hui, pour économiser l'énergie, nous avons tendance à construire des bâtiments très

hermétiques. L'accumulation de ces divers gaz, mais aussi des bactéries en suspension dans l'air et des composés chimiques organiques volatils (COV), détériore la qualité de l'air intérieur. La pollution de l'air à l'intérieur des habitations figure maintenant parmi les cinq principales menaces pour la santé humaine.

Pour améliorer la qualité de l'air intérieur, les spécialistes de la construction recommandent d'aérer toujours plus. La plupart des bâtiments font entrer de l'air frais depuis l'extérieur par un conduit, et mélangent cet air à de l'air intérieur recirculé. Toutefois, les systèmes de ventilation posent quatre problèmes principaux : ils limitent l'efficacité énergétique du bâtiment, ils font entrer de l'air extérieur souvent pollué, et ils impliquent de devoir chauffer ou rafraîchir l'air extérieur amené, pour notre confort. Enfin, on peut se demander s'il est écologiquement responsable de relâcher de nouveaux polluants dans l'environnement extérieur. Les systèmes végétaux et pédologiques (basés sur les plantes et les sols), dérivés de systèmes conçus pour les futures explorations de l'espace extra-atmosphérique, peuvent nous apporter des solutions en nous ramenant aux processus fondamentaux qui soutiennent la vie sur Terre. Deux expériences pionnières et décisives ont étudié les propriétés et les possibilités de ces systèmes dans les années 1980 : le projet Biohome de la NASA et le projet Biosphere 2.

RECHERCHES DE LA NASA ET PROJET BIOHOME

Après le succès de la mission sur la Lune en 1969, la NASA a lancé des programmes visant à maintenir la vie pendant les séjours spatiaux à long terme. Des scientifiques du John C. Stennis Space Center (SSC) ont participé à des recherches visant à mettre au point des « systèmes écologiques clos de support de vie ». La charte de la NASA stipule que les recherches effectuées doivent faire l'objet d'études d'applicabilité et de transposabilité à la Terre, par exemple dans le domaine de la

pollution environnementale. Les scientifiques du SSC ont mis au point et installé des milieux humides artificiels, aujourd'hui appelés systèmes de phytoremédiation, pour traiter les eaux usées domestiques et industrielles du centre de recherche. Ces systèmes d'origine végétale traitent les eaux usées depuis plus de quarante ans, soit le double de la durée de vie moyenne des systèmes mécaniques conventionnels. Ils permettent à la NASA d'économiser des millions de dollars en coûts d'exploitation¹.

En 1980, les scientifiques de la SSC ont découvert que les plantes d'intérieur pouvaient éliminer les COV contenus dans les chambres d'essai hermétiques. La NASA a publié ses premiers résultats en 1984^{2,3}. Pour approfondir ces découvertes, elle a construit un « Biohome » en matériaux synthétiques, conçu pour être aussi hermétique que possible en matière d'air et d'énergie. L'espace intérieur a été divisé en deux, entre un logement pour une personne et un système de biorégénération, destiné à assurer la purification de l'air et le traitement des eaux usées⁴.

On a supposé que les émissions de COV dues aux matériaux synthétiques utilisés pour la construction et l'ameublement du Biohome causaient des problèmes de qualité de l'air intérieur. En effet, la plupart des visiteurs ressentaient des brûlures aux yeux et à la gorge et souffraient de problèmes respiratoires.

Des plantes vertes d'intérieur classiques, poussant dans du terreau du commerce, ont été placées dans le logement du Biohome afin d'évaluer leur capacité à éliminer les COV. Une jardinière expérimentale dotée d'un ventilateur a été ajoutée, contenant une plante poussant dans un mélange de terre et de charbon actif. Des analyses de la qualité de l'air par spectromètre de masse/chromatographie gazeuse,

1 Wolverton, B.C. et J.D. Wolverton, Growing Clean Water – Nature's Solution to Water Pollution, Dolphin Press, 2001.

2 Wolverton, B.C., R.C. McDonald et E.A. Watkins, Jr., Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy-efficient homes, Economic Botany 38(2), 224-228, 1984.

3 Wolverton, B.C., R.C. McDonald et H.H. Mesick, Foliage plants for the indoor removal of the primary combustion gases carbon monoxide and nitrogen oxides, J. MS Acad. of Sci., 30:1-8, 1985.

4 B.C., A. Johnson et K. Bounds, Interior landscape plants for indoor air pollution abatement, NASA/ALCA Final Report, Plants for Clean Air Council, Mitchellville, Maryland, 1989.



Vue de l'intérieur du Biohome. © Bill Wolverton



Chambre scellée en plexiglas utilisée lors des expériences menées par Wolverton Environmental Services, Inc. ©Bill Wolverton

avant et après la mise en place des plantes, ont montré que la plupart des COV avaient été éliminés. En outre, les visiteurs ne ressentait plus de brûlures aux yeux et autres symptômes propres au fameux « syndrome du bâtiment malsain » (*sick building syndrome*). C'était la première fois que l'on utilisait les plantes pour lutter contre ce syndrome.

La technologie dite de « phytoremédiation » utilise les plantes et les bactéries de leurs racines pour éliminer les polluants de l'air et de l'eau. Au début des années 1990, des études ont évalué la manière dont les écosystèmes végétaux éliminent les COV des chambres hermétiques. Dans ses recherches, la NASA n'utilisait qu'une seule injection de COV dans les chambres hermétiques. On s'est alors demandé si les plantes étaient capables d'éliminer des COV se dégageant en continu des matières synthétiques, comme c'est souvent le cas dans un environnement intérieur.

Pour répondre à cette question, Wolverton Environmental Services, Inc. (WES) a mené des recherches approfondies^{5,6}. Deux chambres d'essai en plexiglas ont été construites, et deux panneaux de lambris intérieurs, comprenant des résines au formaldéhyde, ont été installés dans chacune des chambres. Un palmier de type *rhaps excelsa* a été placé dans l'une d'elle, l'autre servant de pièce de contrôle.

Les résultats de l'expérience furent les suivants. D'une part, le palmier et sa terre absorbaient les émissions de formaldéhyde qui s'échappaient continuellement des lambris. D'autre part, la température influait sur la rapidité à laquelle le formaldéhyde s'échappait des panneaux : plus il faisait chaud, plus les émanations étaient importantes. Enfin, dans la pièce de contrôle, le formaldéhyde n'a pas été éliminé.

Le palmier ne montrait aucun problème suite à cette exposition prolongée au formaldéhyde. En réalité, sa capacité d'élimination du formaldéhyde augmentait même au fil du temps. Ces études ont indiqué que les racines de la plante et le microbiote s'étaient rapidement adaptés à la présence de formaldéhyde et avaient contribué de façon significative au processus d'élimination chimique. D'autres études ont cherché à évaluer et à quantifier l'impact des bactéries racinaires et du sol dans le processus. Du formaldéhyde et du xylène ont été introduits individuellement dans des chambres scellées contenant des plantes dans deux substrats différents : soit de la terre de rempotage exposée, soit de la terre couverte de sable stérilisé. Les études ont montré que 50 à 65 % de l'élimination des COV pouvaient être attribués aux bactéries des racines et de la terre.

Grâce aux bactéries présentes dans leur rhizosphère⁷, les plantes d'intérieur ne souffrent pas des fortes concentrations de COV, mais améliorent leur capacité à éliminer les produits chimiques avec le temps. Les bactéries des racines et du sol s'adaptent rapidement et se multiplient, produisant de nouvelles générations de bactéries encore plus efficaces

Les feuilles des plantes et le microbiote racinaire contribuent à l'élimination des COV de l'air intérieur

face aux produits chimiques, qui sont utilisés comme source d'alimentation et d'énergie. Des scientifiques de l'Université de Sydney, en Australie, ont mené des études similaires et obtenu des résultats comparables en matière d'efficacité⁸.

Ces conclusions et celles des recherches déjà réalisées montrent que les feuilles des plantes et le microbiote racinaire contribuent à l'élimination des COV de l'environnement intérieur. La capacité des feuilles à absorber, métaboliser et/ou transporter certains COV vers les bactéries des racines où ils sont décomposés a bien été documentée. Des études montrent que 90 % de ces substances sont transformées en sucres, en nouvelles matières végétales et en oxygène. Les scientifiques du GSF-National Research Center for Environment and Health, en Allemagne, ont réalisé l'étude la plus complète à ce jour sur ce phénomène. Ils ont utilisé des traceurs de carbone radioactifs pour suivre la décomposition du formaldéhyde par la plante araignée (*Chlorophytum comosum L.*)⁹.

La transpiration est un autre mécanisme utilisé par les plantes pour faire descendre l'air dans leur système racinaire. En faisant remonter l'eau de leurs racines jusqu'à leurs feuilles, elles créent un petit courant de convection qui tire l'air vers le bas jusqu'à la zone racinaire. Par ce processus, une plante transporte non seulement les gaz atmosphériques comme l'oxygène et l'azote vers sa zone racinaire, mais aussi les produits chimiques en suspension dans l'air. En raison de cette action, une plante au taux de transpiration élevé est généralement plus efficace pour éliminer les COV¹⁰.

Toutes les études initiales de la NASA sur les plantes d'intérieur portaient sur des plantes cultivées dans du terreau commercial. Pour aller plus loin, les chercheurs de Wolverton Environmental Services (WES) se sont appuyés sur ces recherches pionnières pour utiliser l'hydroculture plutôt que du terreau de rempotage.

L'hydroculture offre en effet des avantages en milieu intérieur en éliminant le besoin de terre et en limitant l'arrosage, le gaspillage d'eau, le risque de moisissure et le rempotage, les plantes utilisant seulement l'humidité dont elles ont besoin.

Les recherches de WES en hydroculture montrent que les feuilles émettent des substances qui réduisent la quantité de moisissures et de bactéries dans l'air ambiant, des mécanismes qui seront approfondis par d'autres recherches. En effet, selon ces études, les plantes cultivées en hydroculture seraient 30 à 50 % plus efficaces pour éliminer les produits chimiques en suspension dans l'air que les plantes cultivées dans du terreau.

5 Wolverton, B.C. et J.D. Wolverton, Plants and soil microorganisms — removal of formaldehyde, xylene and ammonia from the indoor environment, *J. MS Acad. of Sci.*, 38(2):11-15, 1993.

6 Wolverton, B.C. et J.D. Wolverton, Interior plants: their influence on airborne microbes inside energy-efficient buildings, *J. MS Acad. of Sci.*, 41(2):99-105, 1996.

7 La rhizosphère est la région du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés qui font partie du microbiote des plantes.

8 Wood, RA, et al., « Study of absorption of VOCs by commonly used indoor plants », *proceedings of Indoor Air '99*, 1999, 2:690-694. Wood, RA, et al., « Potted plant growth media: interactions and capacities in removal of volatiles from indoor air », *J of Environ. Hort. and Biotechnology*, 2002, 77(1):120-129. Wood, RA, MD Burchett, et al., « The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution; I. Office Field Study », *J of Water, Air and Soil Pollution*, 2006, 175(1-4): 163-180. Torpy FR, Irga PJ, Moldovan D, Tarran J, Burchett MD (2013) Characterization and biostimulation of benzene biodegradation in the potting-mix of indoor plants. *Journal of Applied Horticulture* 15(1): 10?15.

9 Giese, M., U. Bauer-Dorant, C. Langebartels et H. Sandermann, Jr., 'Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum L.*) cell suspension cultures', *Plant Physiology*, 1994, 104:1301-1309.

10 Wolverton, B.C., *How to Grow Fresh Air*, Penguin, New York, 1997; initialement publié aux Royaume-Uni sous le titre *Eco-Friendly Houseplants*, Weidenfeld & Nicolson Ltd., London, 1996; aujourd'hui traduit dans 16 langues.

Le projet de la NASA et recherches de WES qui ont suivi ont également débouché sur la création d'un filtre de haute efficacité pour les jardinières, dont les applications commerciales (filtres à air portatifs à base de plantes) indiquent une efficacité d'élimination des COV de l'air intérieur 50 à 100 fois supérieure aux plantes en pot classiques. Ces filtres à air utilisent un ventilateur mécanique pour aspirer l'air à travers un substrat hautement adsorbant où est cultivée une plante d'intérieur. Le substrat piège les polluants en suspension dans l'air, puis les bactéries de la rhizosphère les décomposent. Ils constituent alors une source de nourriture et d'énergie, pour eux-mêmes et pour leur plante hôte. Comme les bactéries s'adaptent rapidement et deviennent plus efficaces au long de leur exposition, un filtre biorégénérateur ou autonettoyant est créé. Ces produits sont très efficaces pour éliminer les COV dans des espaces confinés de petite dimension, comme des bureaux ou certaines pièces de vie.

LE PROJET BIOSPHERE 2

Parallèlement, Space Biosphere Ventures a étudié un phénomène similaire au sein de l'installation Biosphere 2 d'Oracle, en Arizona. Initialement conçu comme un nouveau type de laboratoire visant à étudier les processus fondamentaux de notre biosphère mondiale et l'interaction de ses mini-biomes internes, Biosphere 2 a permis d'étudier en détails son auto-organisation et l'adaptation des zones biologiques internes et d'effectuer des mesures précises des dynamiques écologiques, notamment des cycles de l'air, de nutriments et d'eau. Le projet a également contribué au développement des écotecnologies et des manières d'intégrer des technologies préservant le vivant¹¹.

¹¹ Nelson, M., T. Burgess, A. Alling N. Alvarez-Romo, W. Dempster, R. Walford et Allen. 1993a. Using a closed ecological system to study Earth's biosphere: Initial results from Biosphere 2. *BioScience* 43(4): 225-236. Alling, A. et M. Nelson. 1993. *Life Under Glass: The Inside Story of Biosphere 2*, Biosphere Press, Tucson, également publié en néerlandais (1993) et en japonais (Kdansha Press, 1997). Nelson, M., 2018. *Pushing Our Limits: Insights from Biosphere 2*, University of Arizona Press, Tucson.

Quand le projet Biosphere 2 a été lancé au milieu des années 1980, la qualité de l'air intérieur était une préoccupation grandissante. En effet, à cette époque, les économies d'énergie étaient une priorité et les immeubles et les maisons conçus de façon aussi hermétique que possible. Or, les environnements clos posent des problèmes spécifiques, comme la régénération et le maintien d'un air et d'une eau de qualité. Deux heureux hasards ont permis à l'équipe de conception de Biosphere 2 de faire de la biofiltration plante/terre une approche écologique et peu coûteuse permettant de prévenir l'accumulation de gaz à l'état de traces. Premièrement, B.C. Wolverton, alors en collaboration avec le Stennis Space Center de la NASA, travaillait déjà sur le projet d'adaptation des terres humides destiné à traiter et recycler les déchets d'origine humaine, animale et de laboratoire¹². Wolverton était d'ailleurs l'un des premiers à étudier les plantes dans ce contexte, montrant que les plantes d'intérieur communes pouvaient éliminer de façon efficace certains polluants classiques comme les composés organiques volatils¹³. Le deuxième hasard a été la rencontre avec Hinrich Bohn, professeur à l'Université de l'Arizona toute proche et originaire d'Allemagne, où cette technologie était apparue au début du XX^e siècle. Avec son frère basé à l'Université du Connecticut, il travaillait déjà au développement de cette approche innovante, alors appelée « soil bed reactors ». La biofiltration par la terre était beaucoup plus utilisée en Europe qu'aux États-Unis, notamment en Allemagne et aux Pays-Bas. Elle y est même considérée comme la meilleure solution face aux mauvaises odeurs industrielles causées par les gaz polluants¹⁴.

¹² Nelson, M., Finn, M, Wilson, C., Zabel, B., van Thillo, M., Hawes, P. et R. Fernandez, 1999. Bioregenerative recycle of wastewater in Biosphere 2 using a created wetland: two year results, *Ecological Engineering* 13(1-4): 189-197. Nelson, M., et Wolverton, B.C., 2011. *Plants + Soil/Wetland Microbes and Food Crop Systems that also Clean Air and Water*, *Adv. Space Research* 47(4):582-590.

¹³ Wolverton, B.C., Johnson, A., Bounds, K. *Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement*, NASA/ALCA Final Report. Plants for Clean Air Council, Davidsonville, Maryland, 1989. Wolverton, B.C., McDonald, R.C., Watkins Jr., E.A. *Foliage plants for removing indoor air pollution from energy-efficient homes*. *Economic Botany* 38 (2), 224-228, 1984.

¹⁴ Bohn, H.L. 1972. *Soil Adsorption of Air Pollutants*. *J. Envir. Quality*, 1:372-377. Bohn, H.L. 1975. *Soil and Compost Filters of Malodorous Gases*, *APCA* 25:953-955. Bohn, H.L. et R.K. Bohn, 1986. *Soil bed scrubbing of Fugitive Gas Releases*, *J. Environ. Sci. Health A21:561-569*.



Modules de test des systèmes écologiques fermés utilisés lors du projet Biosphère 2. La construction a démarré en 1987 et la première mission a commencé en septembre 1991. © Mark Nelson

Cette méthode tire parti de l'immense population et de la diversité métabolique que l'on trouve dans le microbiote de la terre. Plus la matière organique est présente, plus la terre est efficace, comme dans le compost ou les sols amendés. La biofiltration par la terre peut réguler une vaste gamme de gaz potentiellement polluants, présents à l'état de traces. Toutefois, il reste encore des recherches à faire. Il y a notamment des limites, notamment par rapport à une règle empirique selon laquelle la biofiltration par la terre ne peut fonctionner qu'avec les gaz qui brûlent dans l'air (capables d'oxydation). Cette technologie n'est pas non plus capable de traiter des charges polluantes extrêmement concentrées. La biofiltration nécessite le maintien d'une température et d'un niveau d'humidité précis et le choix d'un substrat offrant la porosité, la surface et le contenu organique souhaités¹⁵.

Pour étudier si le projet pouvait opter pour la biofiltration par la terre, un programme de recherche de trois ans a été lancé.

Pour commencer, il fallait déterminer s'il était possible de combiner la biofiltration par la terre tout en faisant pousser des plantes. Soixante-douze plates-bandes de cultures vivrières équipées de pompes poussant l'air des serres à travers les substrats ont été testées à l'Environmental Research Laboratory (ERL) de l'Université de l'Arizona. Ces études ont démontré qu'il n'y avait aucun impact négatif sur la croissance et la productivité des cultures. En réalité, les rendements étaient même plutôt meilleurs, sans doute parce que les sols étaient bien aérés¹⁶.

15 Nelson, M. & Bohn, H. (2011) Soil-based biofiltration for air purification: potentials for environmental and space life support application. *Journal of Environmental Protection*.

16 Frye, R. J. et Hodges, C. N. 1989. Soil Bed Reactor Work of the Environmental Research Lab of the University of Arizona in Support of the Research and Development of Biosphere 2. In: *Biological Life Support Technologies: Commercial Opportunities*. NASA Conf. Publ. 3094. Pp 33-40.

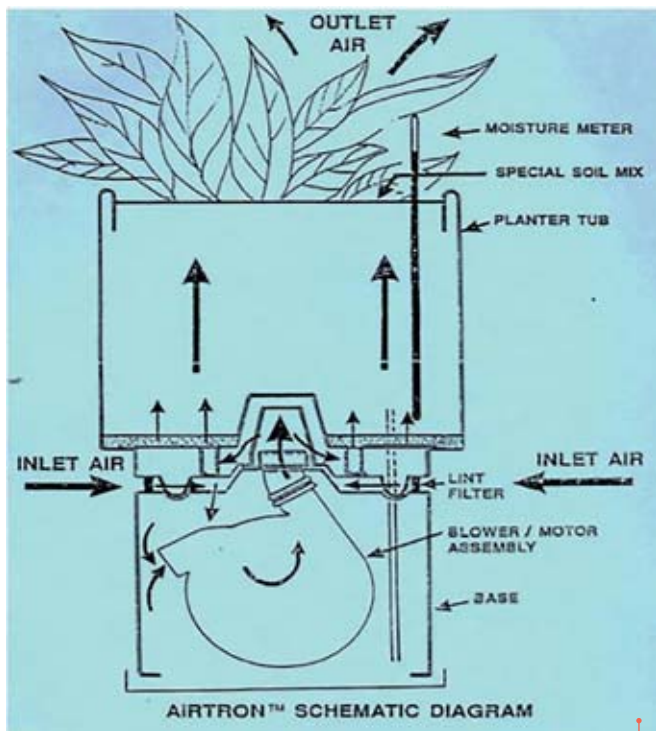


Schéma d'une unité « airtron » de biofiltration développée dans le cadre du projet Biosphère 2. ©Mark Nelson

Les expériences sur la biofiltration des plantes et de la terre dans le module d'essai Biosphère 2 étudiaient les taux d'élimination des traces de gaz injectés tels que l'éthylène, le monoxyde de carbone, les Nox (oxydes d'azote), le méthane et les gaz d'origine technologique comme le formaldéhyde et le toluène. Cette recherche, couplée à des essais similaires menés à l'ERL dans des aquariums scellés, examinait l'efficacité de cette technologie et l'impact de différents facteurs tels que les débits, l'exposition préalable du microbiote de la terre aux traces de gaz spécifiques ou le type de sols et leur contenu organique^{17 18}.

L'ensemble du substrat agricole de Biosphère 2 était conçu pour fonctionner comme un biofiltre plante/terre car la totalité de l'air de l'installation pouvait être pompé dans la terre en 24 heures environ, si les concentrations de gaz à l'état de traces nécessitaient des mesures immédiates¹⁹.

Les recherches menées dans le cadre de Biosphère 2 sur la biofiltration des plantes et de la terre montrent qu'il est possible de maintenir des niveaux élevés de productivité des cultures et de fertilité des terres, tout en assurant la biofiltration de l'air, et que l'efficacité de l'élimination des gaz traces dépend des populations du microbiote de la terre capables de les métaboliser.

La biofiltration par la terre se limitait à l'époque à des applications industrielles, mais il était possible de la développer pour d'autres applications, notamment pour lutter contre

17 Alling, A. & Nelson, M. (1993) *Life Under Glass: The Inside Story of Biosphere 2*. Tucson, AZ: Biosphere Press.

18 Frye, R. J. et Hodges, C. N. 1989. Soil Bed Reactor Work of the Environmental Research Lab of the University of Arizona in Support of the Research and Development of Biosphere 2. In: *Biological Life Support Technologies: Commercial Opportunities*. NASA Conf. Publ. 3094. Pp 33-40.

19 Nelson, 2018, *Pushing Our Limits: Insights from Biosphere 2*.



Prototype utilisé dans le bâtiment de contrôle de la mission Biosphère 2. ©Mark Nelson

la pollution de l'air intérieur. Un produit commercial appelé « airtron » a été développé par le projet Biosphère 2 au début des années 1990. Ce dispositif a permis de transformer une simple jardinière pour plantes d'intérieur en un biofiltre plante/terre en installant une pompe à air qui forçait l'air à traverser le substrat, exposant ainsi ses polluants aux bactéries de la terre et des racines capables de les détoxifier.

AUTRES TRAVAUX DE RECHERCHE

Des travaux approfondis menés par le WES et par d'autres chercheurs européens, canadiens, indiens, coréens, australiens et japonais ont largement documenté la manière dont les plantes d'intérieur peuvent contribuer à améliorer la qualité de l'air dans les bâtiments énergétiquement efficaces²⁰. Elles éliminent davantage de polluants atmosphériques nocifs à l'intérieur des bâtiments étanches que dans les constructions trop ventilées. En effet, aucun dispositif de filtrage ne peut nettoyer efficacement l'air d'un bâtiment si la ventilation mécanique le renouvelle en permanence. Dans les zones urbaines, l'air extérieur est généralement chargé de polluants. En outre, un bâtiment n'est pas vraiment efficace énergétiquement s'il faut constamment refroidir ou réchauffer l'air pour le rendre conforme au confort humain.

D'autres travaux de recherche ont également démontré que les personnes travaillant à proximité de plantes sont plus productives, plus heureuses et moins stressées. Les éléments recueillis au cours des vingt dernières années confirment largement les effets bénéfiques sur la santé des plantes d'intérieur, qui captent également le dioxyde de carbone et produisent de l'oxygène. Ces fonctions sont encore plus importantes quand on installe un très grand nombre de plantes dans des serres sur les toits, dans des vérandas ou des atriums²¹.

CONCLUSION : VIVRE DANS DES ESPACES INTÉRIEURS SAINS

Ces études pionnières ont montré que les plantes et la biofiltration par la terre peuvent être un outil de bioremédiation important et une technologie prometteuse dans la lutte contre le problème planétaire majeur de la pollution de l'air. Même si le pouvoir de purification des plantes a souvent été contesté au cours des dernières années, leur capacité à éliminer les toxines chimiques volatiles en conditions de laboratoire et dans des espaces étanches est aujourd'hui reconnue. En outre, elles nécessitent des investissements en capital moindres et leurs coûts de fonctionnement sont nettement inférieurs à ceux des technologies concurrentes.

Certes, comme toute autre technologie, elle a ses limites, par exemple en cas de pollution atmosphérique très forte ou pour des polluants face auxquels le temps de réaction est plus long, induisant des temps de traitement irréalistes. Toutefois, le champ des applications possibles n'en demeure pas moins étendu.

Cette technologie présente de nombreux atouts qui pourraient notamment être mis à profit pour la survie prolongée dans l'espace. Elle permet notamment de transformer une unité de production alimentaire en dispositif de purification de l'air, peu gourmand en entretien, en consommables et en énergie.

La biofiltration par les sols et les plantes constitue également une méthode idéale pour lutter contre la pollution de l'air intérieur. En effet, un sol riche offre la biodiversité nécessaire pour s'adapter naturellement à tous les gaz libérés dans un bureau ou un logement. En utilisant les plantes d'intérieur comme des biofiltres dans les logements et les bureaux, ou encore les atriums arborés ou la végétation urbaine (parcs, murs végétalisés et jardins sur les toits), nous pouvons améliorer la qualité de l'air que nous respirons.

De nombreux espaces publics et immeubles commerciaux abritent des plantations intérieures. Et il existe aujourd'hui de nouveaux dispositifs, comme les murs végétalisés, les murs vivants ou les jardins verticaux, des systèmes souvent installés en premier lieu pour des raisons esthétiques. Or, il est tout à fait possible d'aller plus loin, comme le font déjà certains, en mettant à profit les fonctions biologiques des plantes et des microbes pour améliorer la qualité de l'air, à l'image de Takenaka Garden Afforestation, Inc., leader du marché japonais de l'aménagement paysage intérieur, et son jardin écologique (Ecology Garden®) ou bien le centre d'affaire Paharpur Business Center, Nehru Place Greens à New Delhi (Inde)²².

En fin de compte, l'objectif recherché consiste à développer une technologie de filtrage de l'air basée sur les plantes qui pourrait traiter la totalité de l'air d'un immeuble. L'idée du « whole building concept » a donné lieu au développement de systèmes modulaires de plus grande échelle, permettent de regrouper un plus grand nombre de plantes et d'installer des systèmes d'arrosage automatique. Ils peuvent en outre être reliés au système de chauffage, de ventilation et de climatisation²³, ce qui permet à l'air interne de transiter par différents modules végétaux pour se débarrasser de ses polluants avant de retrouver l'environnement interne. Ce processus permet de limiter les besoins en ventilation externe.

Il semble essentiel de creuser cette idée de « whole building concept » et d'investir davantage dans ces innovations. La biofiltration par les plantes et le sol est une technologie résolument verte, un merveilleux exemple d'ingénierie écologique qui devrait être déployé plus largement à une époque où nous cherchons à tisser des liens plus durables, plus axés sur la régénération, entre notre technosphère et notre biosphère.

20 Professeur Margaret Burchett, University of Technology, Sidney, Australie (extensive research on plants and their ability to improve indoor air quality). Kozaburo Takenaka, Takenaka Garden Afforestation, Inc., Tokyo, Japon (Ecology Gardens for improving indoor air quality and patient/staff comfort in hospitals). Professeur Tov, Fjeld, Agricultural University of Norway, Oslo, Norvège (Plants for human health and well-being in offices). Kamal Meattle, The Paharpur Business Center, New Delhi, Inde (Interior plants for improving indoor air quality in office buildings). Professor Priscilla Pegas, University of Aveiro, Portugal (Interior plants for improving indoor air quality in classrooms)

21 Wolverton, B.C. et Kozaburo, Takenaka. *Plants: Why You Can't Live Without Them*. Roli Books, New Delhi, Inde, 2010.

22 Kamal Meattle, Paharpur Business Center, New Delhi, Inde. Interior plants for improving indoor air quality in office buildings.

23 Paharpur Business Centre et Software Technology Incubator Park. Heating, ventilating and air conditioning system.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR : LES NOUVELLES TECHNOLOGIES AU SERVICE DE LA SANTÉ

Yann Boquillod
Fondateur de AirVisual



Illustration de l'application mobile AirVisual

Ingénieur de formation, Yann Boquillod a été sensibilisé à la question de la qualité de l'air au travers de son expérience de vie en Chine. Les questionnements liés à l'impact de la pollution sur la santé l'ont incité à imaginer dès 2010 une solution de mesure de la qualité de l'air intérieur, un outil jusqu'alors inexistant. La création de l'entreprise *AirVisual* en 2015 a permis le développement de capteurs novateurs et intuitifs, permettant de mesurer et d'interpréter la qualité de l'air (particules fines, CO₂, hygrométrie, etc.). Le rachat d'*AirVisual* en 2017 par *IAQair*, entreprise suisse spécialisée dans les filtres à air, permet aujourd'hui d'offrir des solutions de mesure et de purification de la qualité de l'air intérieur s'appuyant sur le *big data* et l'intelligence artificielle.

Si les espaces clos sont souvent considérés comme étant protégés de la pollution extérieure, l'air y est bien souvent contaminé par un certain nombre de substances nocives, issues des usages domestiques quotidiens comme le chauffage ou la cuisine ; mais aussi de la pollution extérieure liée aux transports, à l'industrie, etc. en particulier dans des grandes métropoles asiatiques.

Créée en 2015 par deux entrepreneurs français, l'entreprise *AirVisual* est une entreprise dont l'objectif principal est d'œuvrer à la sensibilisation en matière de qualité de l'air. En offrant des capteurs connectés de mesure de la qualité de l'air intérieur, cette entreprise propose à chacun d'optimiser la qualité de son air intérieur et par-là même de limiter les risques sanitaires liés aussi bien à l'exposition aux particules fines qu'aux concentrations trop élevées en CO₂. En outre, la compilation de données gouvernementales, d'imageries satellites et de données provenant de capteurs extérieurs installés par *AirVisual* dans le monde entier a permis à la *start-up* de créer un planisphère interactif de la qualité de l'air sur la planète, facilitant la prise de conscience des enjeux liés à la qualité de l'air et encourageant des solutions pertinentes selon le contexte local.

Quelles sont les raisons qui vous ont incité à créer une *start-up* dans le domaine de la qualité de l'air ?

Yann Boquillod : A Pékin, la qualité de l'air est un réel enjeu en matière de santé, compte tenu de l'exposition à la pollution. C'est une prise de conscience de cet enjeu au moment où je décidais de m'installer dans cette ville qui est à l'origine de la création d'*AirVisual*. Je souhaitais aussi mettre à profit mon expertise du *big data* et de l'intelligence artificielle et l'appliquer à la problématique de la qualité de l'air. Avec mon associé, nous avons fait le choix le choix d'établir *AirVisual* en Chine en raison de la présence de toute une chaîne logistique et d'approvisionnement ; qui représente un réel avantage comparatif. La vitesse de développement des projets en Chine étant par ailleurs très favorable, nous avons pu développer notre entreprise rapidement.

Autre atout clé : dans des villes aussi polluées, les espaces clos peuvent apparaître comme des remparts à la pollution, et le besoin de mesurer la qualité de l'air intérieur se fait ressentir.

Pourtant, à l'époque où je me suis installé, aucun capteur autre que les moniteurs gouvernementaux ne permettait de mesurer le niveau de pollution de l'air intérieur. Ces machines extrêmement coûteuses (entre 30 000 et 50 000 dollars pour l'équipement) et dédiées à la mesure de la qualité de l'air en extérieur ne semblaient pas adaptées à l'étude de la qualité de l'air chez les particuliers.

C'est de ce constat que sont nés les « *Nodes* », les capteurs devenus *AirVisual Pro*, qui mesurent à la fois :

- Les particules fines, qui affectent la santé sur le long terme ;
- La concentration en CO₂ afin d'évaluer le niveau de ventilation des espaces clos ;

La représentation explicite de la qualité de l'air et son accès simplifié est en enjeu de santé publique

- Des données moins complexes comme la température et l'humidité.

Il est difficile de voir la pollution de l'air de ses propres yeux, alors nous avons voulu la rendre concrète. Ces capteurs permettent d'avoir une approche globale du confort ressenti.

Quel est le principe de fonctionnement d'*AirVisual* ?

Y. B. : Dès le début de l'aventure, nous avons eu à cœur de changer l'approche de la qualité de l'air existante en intégrant le *big data* et l'intelligence artificielle à notre offre (notamment dans le cadre de la validation des données), afin de proposer un système de mesure précis.

L'objectif d'*AirVisual* est double.

La volonté première consiste à préserver la qualité de l'air intérieur en recourant notamment à l'intelligence artificielle, qui permet de proposer des solutions adaptées et concrètes aux utilisateurs.

Le « *node* » d'*AirVisual* (*AirVisual Pro*) est un appareil personnel portable de mesure de la qualité de l'air. Pour calculer la concentration en PM_{2,5}, il comptabilise les interruptions d'un laser liées aux particules envoyées par un micro-ventilateur. L'appareil mesure jusqu'à six polluants (ceux qui sont les plus présents dans l'air, conformément à l'indice AQI¹). Les données récoltées sont envoyées sur un *cloud*, puis analysées par un système d'intelligence artificielle. En fonction des résultats, le système prend des décisions en matière de remédiation de la qualité de l'air : des consignes sont

¹ Air Quality Index. Les polluants les plus présents dans l'air sont l'ozone, les particules PM2.5, PM10, l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone



Utilisation du capteur *AirVisual Pro* pour mesurer la qualité de l'air en intérieur

directement envoyées à des systèmes de purification connectés, permettant une gestion de la qualité d'air intérieure quasiment autonome.

Il convient de souligner que cette option n'est adaptée que dans les pays où l'aération et les systèmes de filtration conventionnels ne peuvent être envisagés comme des solutions. En France par exemple, il suffit parfois d'aérer au bon moment les espaces clos en ouvrant les fenêtres plutôt que d'installer un purificateur d'air. En Chine, le coût de l'installation du système dans son ensemble peut monter jusqu'à 3 000 ou 4 000 euros pour un ménage.

L'utilisation des capteurs en extérieur est une adaptation de notre projet au marché. La démarche répond surtout à un enjeu de société. Notre but est de doter la planète d'un gigantesque réseau de capteurs qui permette d'établir, en temps réel, une carte du monde de la pollution avec la plus fine granularité possible. Aujourd'hui, nous pouvons visualiser les trajectoires des particules fines en temps réel partout dans le monde à l'aide d'un planisphère interactif : *AirVisual Earth*. Pour cela, nous utilisons nos capteurs individuels pour mesurer la qualité de l'air en intérieur et extérieur, puis recoupons les données recueillies avec celles publiées par chaque pays via leurs dispositifs de mesure officiels, afin d'obtenir une image globale de la pollution aux particules fines. Lorsque les données sont difficile d'accès (ex : vastes zones inhabitées), nous utilisons les images satellitaires et les prévisions météorologiques afin de modéliser les concentrations de particules fines là où les capteurs ou les données publiques sont absents.

La complémentarité des capteurs intérieurs et extérieurs permet d'avoir une approche systémique et de proposer des solutions adaptées aux menaces de pollution. Aujourd'hui, plus de 100 000 capteurs *AirVisual* sont disposés à travers le monde. 120 pays sont équipés de capteurs intérieurs et 80 pays disposent de capteurs extérieurs. Ces capteurs nous permettent de fournir en temps réel des indications sur la qualité de l'air via un site web et une application, qui recense à l'heure actuelle 10 millions d'utilisateurs.

Quels sont les enjeux liés à la collecte et l'accessibilité des données dans ce domaine ?

Y. B. : Les gouvernements rapportent les données de pollution selon des formats différents. Notre rôle est d'homogénéiser ces données pour qu'elles puissent être comparables entre elles. C'est un travail de longue haleine, mais qui est nécessaire pour donner une vision globale de la pollution.

Pour présenter nos données, nous avons retenu l'indice américain US AQI², étalonné de 1 à 500 et qui permet de distinguer six seuils distincts, représentant chacun des niveaux de mesures de précaution différents.

Un second enjeu porte sur le fait que les données relatives à la qualité de l'air extérieur sont des données sensibles, particulièrement en Chine où la publication de données extérieures est très fiable, mais contrainte pour des raisons légales (les sources d'information sont contrôlées, et les autres sources de mesures sont peu autorisées). C'est une des raisons pour lesquelles nous avons choisi de nous orienter vers la problématique de la qualité de l'air intérieur (l'autre raison étant que nous avons souhaité favoriser l'accès à tous aux données relatives à la qualité de l'air intérieur afin de prévenir les risques sur la santé).

Les capteurs sont des objets connectés, mais les données demeurent personnelles et ne sont pas publiées automatiquement ; il est ainsi possible pour les utilisateurs de consulter les mesures de la qualité de l'air de leur intérieur sans pour autant renvoyer ces données sur le *cloud*. Par ailleurs, le Règlement général sur la protection des données (RGPD)³ n'est pas un obstacle car nous demandons l'autorisation des utilisateurs avant de publier leurs données.

Concernant la fiabilité des données, des règles très précises ont été établies concernant l'installation du capteur en extérieur. En effet, nous devons nous assurer de la qualité de l'installation car les données seront visionnées par environ 10 millions d'utilisateurs. De même, si nous envoyons des alertes de pollution, il faut que nous soyons sûrs que les données soient fiables, d'où nos procédures strictes d'installation. Par exemple, nous demandons aux utilisateurs d'envoyer des photos du lieu où a été placé le capteur. Un système d'intelligence artificielle vient vérifier que les conditions d'installations optimales sont réunies. Si les données semblent erronées, le système envoie des notifications à l'utilisateur pour qu'il vérifie l'installation.

Comment expliquez-vous l'attrait de ce type de technologie pour les consommateurs ?

Y. B. : Le succès des capteurs *AirVisual Pro* repose en grande partie sur leur simplicité d'utilisation et sur l'aspect visuel de l'information : au-delà de quantifier certaines métriques, nous cherchons à donner un sens aux données, car les chiffres relatifs aux particules fines ou à la quantité de CO₂ dans l'air ne sont pas nécessairement significatifs pour tous. Les données sont accessibles aussi bien sur l'écran du capteur que sur l'application, devenue très populaire dans le domaine de la qualité de l'air extérieur.

En outre, l'icône et les codes couleurs que proposent les capteurs permettent à chacun d'avoir une vision claire de la situation en temps réel. Ce système visuel a d'ailleurs été repris par d'autres structures comme le gouvernement iranien dans sa note explicative sur la qualité de l'air, et a inspiré d'autres applications en lien avec cette thématique.

Le succès des capteurs AirVisual Pro repose en grande partie sur leur simplicité d'utilisation et l'aspect visuel de l'information : au-delà de quantifier certaines métriques, nous cherchons à donner un sens aux données

² United States Air Quality Index

³ Règlement général sur la protection des données, texte européen de référence en matière de protection des données à caractère personnel. <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/reglement-general-sur-protection-des-donnees-rgpd>

Quel est le profil des utilisateurs de vos capteurs dédiés à la qualité de l'air intérieur ?

Y. B. : Aujourd'hui, de plus en plus de chercheurs se penchent sur la relation entre la qualité de l'air au sein d'un bâtiment et l'efficacité et la productivité des occupants. Si les recherches en sont encore à un stade embryonnaire, plusieurs études permettent de mettre en avant l'impact de la concentration en CO₂ sur les performances, des élèves comme des employés. De plus en plus d'entreprises sont désireuses d'offrir un environnement de travail sain à leurs collaborateurs, à l'image de Mercedes qui a beaucoup investi dans des équipements d'amélioration de la qualité de l'air, notamment en Chine. Les écoles aussi multiplient les installations de capteurs. Nous savons que de nombreux enfants utilisent cette application pour connaître les périodes de la journée où la qualité de l'air est adaptée pour pouvoir profiter des espaces extérieurs.

Certaines cliniques ont également fait le choix d'installer des capteurs *AirVisual Pro*, qui permettent d'obtenir des informations sur cette thématique au cœur des préoccupations des établissements de santé.

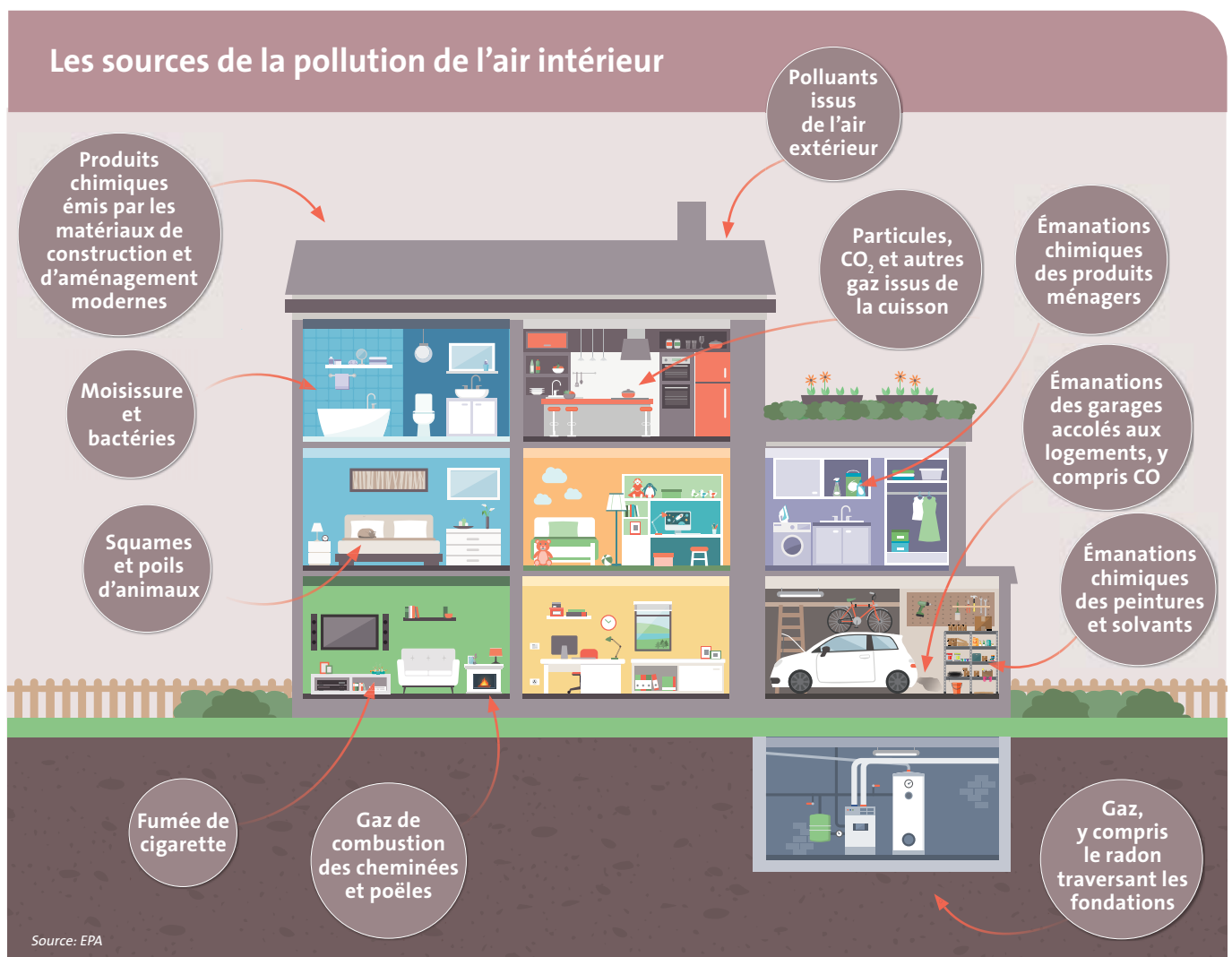
Comment ces nouvelles technologies peuvent-elles influencer la décision publique ?

Y. B. : Les capteurs permettent d'interpeller sur la nécessité d'adopter une approche collective de la problématique : en Thaïlande⁴ par exemple, le déploiement de plus de mille capteurs en extérieur a contribué à porter la question de la qualité de l'air à l'échelle nationale et a eu un réel impact sur des décisions économiques et politiques. La prise en compte de la qualité de l'air extérieur doit être considérée comme un premier pas, qui peut contribuer à sensibiliser les gouvernements sur l'urgence d'une politique ambitieuse en faveur d'une qualité de l'air intérieur plus saine.

De même, des études faites à partir de mesures de capteurs ont démontré qu'un taux de réussite moindre dans certaines écoles (en comparaison avec d'autres établissements scolaires) pourrait être expliqué par le niveau de pollution de l'air intérieur et son impact sur la concentration des élèves.

La multiplication de ces études et leur appropriation par les pouvoirs publics pourrait mener à des prises de décisions en faveur d'une meilleure qualité de l'air intérieur, au moins dans les espaces publics.

4 <https://www.airvisual.com/thailand>



3. DES PERCEPTIONS CITOYENNES AUX POLITIQUES PUBLIQUES : FAIRE CONNAÎTRE UNE POLLUTION INVISIBLE



Les clés du passage à l'échelle des solutions pour la qualité de l'air résident non seulement dans la mise en œuvre de politiques publiques ambitieuses pour garantir un air sain pour chacun, mais aussi dans la prise de conscience citoyenne des impacts sanitaires et environnementaux de la pollution de l'air.

ENCOURAGER LES BONNES PRATIQUES

Pour garantir une meilleure prévention et évaluation des risques, il est nécessaire d'adopter une vision intégrée de la problématique, en associant toutes les parties prenantes. C'est selon cette approche qu'agit la Coalition internationale pour le Climat et l'Air Propre (CCAC) dont le secrétariat, hébergé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), est dirigé par Helena Molin Valdés. Cette initiative (qui réunit gouvernements, organisations internationales, instituts de recherche et membres de la société civile et du secteur privé), met en œuvre, soutient et relaie des solutions innovantes pour lutter contre la pollution de l'air intérieur à travers le monde, notamment dans les zones rurales défavorisées. En matière de politiques publiques, certains pays font figure de précurseurs en promulguant des normes et des procédures qui encouragent les bonnes pratiques et qui systématisent le contrôle de la qualité de l'air intérieur. L'exemple de la Corée du Sud est présenté par Dong Hwa Kang, professeur associé à l'Université de Séoul.

INFORMER LES CITOYENS

Au-delà du renforcement normatif et réglementaire, la question de la perception de la pollution de l'air intérieur par le grand public est cruciale. L'étude menée par le cabinet Elabe en France, en Belgique et à Shanghai, révèle que la pollution de l'air intérieur est désormais largement identifiée comme un risque sanitaire. En témoigne notamment l'anxiété croissante des parents sur la qualité de l'air respiré par leurs enfants à

l'intérieur des bâtiments scolaires. Cependant, la persistance d'un manque d'information sur la qualité de l'air aboutit souvent à des diagnostics subjectifs, aggravés par la difficulté d'identifier les sources de pollution. Ce constat invite à mieux faire connaître cette pollution invisible.

LE RÔLE DE L'ART POUR RÉVÉLER UNE POLLUTION INVISIBLE

L'enjeu de sensibilisation relatif à la qualité de l'air intérieur repose sur la difficulté de porter à notre conscience l'existence d'un danger qui est par essence peu perceptible. En touchant à nos représentations symboliques et à nos émotions, l'art contemporain nous aide à rendre concrets les dangers liés à la pollution de l'air. L'action artistique permet de dépasser la simple compréhension conceptuelle des enjeux de la qualité de l'air en proposant une expérience sensorielle et mémorable pour bouleverser nos certitudes et provoquer l'action : des artistes engagés comme Andrea Polli aux États-Unis ou Michael Pinsky au Royaume-Uni, secondés par des scientifiques (Laura Sommer, Norvège), s'emparent de l'espace public pour y exposer un art climatique qui interroge le spectateur sur sa propre part de responsabilité.

Cédric Baecher, Fanny Sohui,
Leah Ball et Octave Masson,
Coordinateurs,
Nomadéis

PERCEPTION CITOYENNE DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR EN CHINE, BELGIQUE ET FRANCE : chronique de la découverte d'un ennemi invisible

Laurence Bedeau
associée au sein du cabinet ELABE



Laurence Bedeau est associée au sein du cabinet ELABE. Avec une équipe d'une vingtaine de consultants, elle accompagne ses clients dans leur stratégie de communication en combinant trois métiers complémentaires : le conseil, les études d'opinion et le planning stratégique.

Spécialiste des questions d'opinion publique, elle a travaillé auparavant chez TNS Sofres et dirigé le pôle Opinion-Corporate-Qualité de Vie au Travail de l'institut d'études CSA¹.

¹ Consumer Science and Analytics (CSA) est un institut de référence des études marketing et d'opinion

Restée relativement méconnue de l'opinion publique jusqu'au début des années 2000, la pollution de l'air intérieur est désormais perçue par une majorité d'habitants en France, en Belgique mais aussi en Chine comme la cause probable de symptômes tels que les maux de tête, la fatigue ou l'irritation des yeux et des voies respiratoires ; et de problèmes de santé de manière générale. Cependant, le défaut d'information sur la qualité de l'air à l'intérieur des espaces clos fréquentés (lieux privés, lieux de travail et de passage, transports) aboutit souvent à des diagnostics subjectifs, aggravés par la difficulté d'identifier les sources de pollution de l'air intérieur. Pourtant, il s'agit bien d'un enjeu de santé publique, comme en témoigne l'anxiété croissante des parents sur la qualité de l'air respiré par leurs enfants à l'intérieur des bâtiments scolaires par exemple. Dans ce contexte, le renforcement réglementaire et normatif relatif à la qualité de l'air intérieur est aujourd'hui jugé indispensable, afin de garantir une meilleure prévention et évaluation des risques.

INTRODUCTION

L'attention de l'opinion publique mondiale envers la qualité de l'air n'est pas nouvelle, mais elle a profondément changé d'intensité et de nature au cours des 20 dernières années. Elle est le fruit d'un long chemin de prise de conscience, dont l'étape la plus récente est l'extension de la vigilance du grand public à l'air que nous respirons à l'intérieur de lieux de vie clos (logements, écoles, bureaux, transports, lieux de divertissement, de consommation...). Des espaces dans lesquels nous passons environ 80 % de notre temps lorsque nous vivons sous des climats tempérés ! Longtemps parent pauvre de l'attention médiatique et des pouvoirs publics, la qualité de l'air intérieur surgit aujourd'hui comme un nouvel épouvantail dans la longue liste des périls écologiques. La chronique de la découverte de ce nouvel « ennemi public » par l'opinion commence par un changement de point de vue, au moment où l'environnement est devenu le problème de tous, après avoir longtemps été la cause de quelques-uns. C'est un détour nécessaire pour comprendre pourquoi et comment, en 2019, habitants de Shanghai, Belges et Français interrogent d'une même voix les faiblesses actuelles de l'évaluation de la qualité de l'air intérieur et appellent à une action collective, alors qu'au début des années 2000 l'air intérieur était encore confiné au domaine savant.

LE JOUR OÙ L'ENVIRONNEMENT EST DEVENU LE « PROBLÈME DE TOUS »

En décembre 2017, deux ans après la signature de l'Accord de Paris, entreprises, États, institutions publiques et philanthropes réunis au *One Planet Summit* rappelaient d'une même voix : « Nous sommes UNE SEULE planète ».

Cette évidence est devenue conviction, avec l'émergence d'une conscience mondiale de l'interdépendance de nos destins. En Asie, en Amérique, au Moyen-Orient, en Europe, en Afrique et en Océanie², une large majorité des habitants affirme : « *quel que soit le pays dans lequel on vit, nos destins sont tous liés par les choix que nous faisons aujourd'hui en matière de lutte contre les pollutions* ».

La certitude de cette solidarité de destin s'accompagne d'un sentiment d'urgence qui traverse les frontières³. Il prend des visages et adopte des formes d'action que nous ne connaissons pas jusqu'alors. En août 2018, Greta Thunberg inaugure la grève scolaire, un mode de mobilisation sans précédent. Sur tous les continents, les marches pour le climat se succèdent, avec une participation massive qui fait se côtoyer « bobos » et classes populaires. Et dans le monde entier, la judiciarisation fait son entrée dans l'arsenal de l'action climatique.

Il serait naïf ou malhonnête d'ignorer les voix divergentes, la résistance tenace du climato-scepticisme et les arbitrages individuels et publics en défaveur de l'environnement. Ils sont légion, partout. Entre autres raisons parce qu'il ne suffit pas d'avoir peur pour renoncer aux modes de vie que des générations ont façonné.

Pourtant, les préoccupations environnementales ont gagné en intensité, et elles ont surtout radicalement changé de nature. Et, ce faisant, elles ont dépassé les clivages sociologiques, idéologiques et partisans.

Que s'est-il passé ? Une révolution profondément égoïste : l'environnement est devenu un enjeu de bien-être personnel, et donc le problème de tous.

D'abstraction collective (« l'humanité ») et lointaine (les « générations futures ») comme on se plaisait à dire dans les années 90), « l'inquiétude écologique » s'est faite individuelle et contemporaine à la fin de la première décennie du 21^e siècle.

A partir des années 1970, les inquiétudes s'expriment. Elles sont minoritaires. En 1968, le Club de Rome se réunit pour la première fois. En 1971, Greenpeace voit le jour. En France, les Amis de la Terre participent à l'élection présidentielle de 1974. Si l'écologie politique est née, la plupart des opinions publiques l'ignorent pendant encore presque deux décennies. L'environnement est la cause de quelques-uns.



C'est surtout à partir des années 90 que l'opinion réagit sous l'effet conjugué de campagnes de sensibilisation à l'initiative des pouvoirs publics, d'une mise à l'agenda politique international et national, et d'événements traumatisants dont l'origine n'est pas toujours à chercher du côté du dérèglement climatique mais qui, à l'époque, lui sont attribués (par exemple en France les inondations de 1992, la tempête de 1999, la marée noire de janvier 2000 ou encore la canicule de l'été 2003).

Les années 2007 et 2008 sont marquées par l'attribution du prix Nobel de la paix au Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) et à Al Gore pour son documentaire *Une vérité qui dérange*. La sensibilité écologique se développe. La préoccupation déclarée dans les études d'opinion augmente sensiblement. Les gestes « responsables » fleurissent.

Mais on se lasse d'avoir peur. L'inquiétude reflue à mesure que diminue la présence des images dans les médias et que s'estompe l'émotion, sincère mais par nature et par nécessité temporaire. Et sous les coups de boutoir d'injonctions économiques et sociales qui déplacent rapidement et légitimement l'attention sur la « fin du mois ».

L'ENVIRONNEMENT EST LA CAUSE D'UNE MINORITÉ QUI GROSSIT MAIS RESTE TOUJOURS MINORITAIRE, ET L'INQUIÉTUDE, PONCTUELLE, D'UNE PETITE MAJORITÉ

Puis la « fin du monde » se signale de plus en plus souvent. De plus en plus violemment. Elle se rapproche. Jusqu'à ce que le quotidien devienne régulièrement une sorte de répétition générale de ce qui pourrait devenir un état permanent : canicule, sécheresse, pics de pollution et leurs conséquences économiques et sanitaires ici et maintenant ne sont plus hypothétiques, variant selon les modèles mathématiques. Nous sommes passés de la théorie (réfutable) à l'expérience (irréfutable) : maladies respiratoires chroniques, troubles cardiovasculaires, pluie qui ne tombe plus, chaleur qui empêche de travailler et contraint la mobilité et les loisirs, sécheresse qui fragilise les maisons et réduit les récoltes. L'environnement de proximité se dégrade. Entre 2011 et 2016, la part des Français

2 « Le défi de nos ressources », étude Elabe pour Veolia réalisée auprès de 14 000 personnes dans 28 pays (échantillons nationaux représentatifs de la population résidente âgée de 18 ans et + de chacun des 28 pays), décembre 2017. <https://challenge-of-resources.veolia.com/>

3 Une majorité des habitants des pays interrogés jugent qu'il est nécessaire d'agir rapidement pour relever le défi écologique (pollutions de l'eau, de l'air et des sols, dérèglement climatique). « Le défi de nos ressources », étude Elabe pour Veolia réalisée auprès de 14 000 personnes dans 28 pays (échantillons nationaux représentatifs de la population résidente âgée de 18 ans et + de chacun des 28 pays), décembre 2017. <https://challenge-of-resources.veolia.com/>

jugeant que l'état de l'environnement est bon dans leur commune est passée de 58 % à 34 %⁴. Et sur la même période les Français déclarant ressentir personnellement les conséquences du dérèglement climatique dans leur vie quotidienne est passé de 43 % à 60 %⁵.

En 2019, 91 % des Français sont préoccupés par la situation de l'environnement, dont 61 % « très préoccupés⁶ ». Et l'environnement est devenu la première priorité des Français se considérant comme appartenant aux milieux populaires, juste devant le pouvoir d'achat⁷. Pollutions et événements climatiques ne font de distinction ni d'origine, ni de classe, ni de conviction partisane, ni de religion, ni de territoire. À tel point que l'opposition entre les personnes faisant de la question environnementale leur priorité et celles qui en font un aspect secondaire est désormais considérée comme le premier clivage de la société française contemporaine, devant le clivage social⁸ !

L'ENVIRONNEMENT EST DEVENU LE PROBLÈME DE TOUS

Dérèglement climatique et pollution atmosphérique ont été les architectes efficaces de ce changement de paradigme. Et science et médecine ont été les maîtres d'œuvre du changement d'échelle, en établissant et en faisant connaître les liens de

causalité entre santé et environnement, déclenchant une montée en puissance ininterrompue des préoccupations concernant la contamination du corps humain par les polluants contenus dans l'air.

AIR INTÉRIEUR : L'APPARITION D'UNE NOUVELLE MENACE ENVIRONNEMENTALE INVISIBLE

LA POLLUTION DE L'AIR EST AUJOURD'HUI AUX PREMIERS RANGS DES ENNEMIS REDOUTÉS⁹

En Europe, elle est le problème jugé le plus préoccupant après le changement climatique¹⁰. Et sur la plupart des continents, la pollution de l'air inquiète et s'impose comme une des trois premières priorités d'action environnementale, côtoyant pollution de l'eau et des océans et accès à une alimentation de qualité pour la santé¹¹.

4 « Baromètre annuel sur les opinions et pratiques environnementales des Français », INSEE pour le Service de la donnée et des études statistiques (SDES), 2011 et 2016.

5 *ibid.*

6 Étude Elabe, juillet 2019.

7 « Fractures françaises », Ipsos pour Le Monde, La Fondation Jean-Jaurès et l'Institut Montaigne, septembre 2019.

8 *ibid.*

9 3^e préoccupation environnementale la plus forte, juste derrière la pollution de l'eau et le dérèglement climatique, étude Elabe, juillet 2019.

10 « Eurobaromètre spécial 468 : attitudes des citoyens européens vis-à-vis de l'environnement », couvre la population de 15 ans et plus ayant la nationalité d'un des 28 pays membres de l'Union européenne et résidant dans un des 28 pays membres de l'Union européenne, octobre 2017. https://data.europa.eu/euodp/fr/data/dataset/S2156_88_1_468_ENG

11 « Le défi de nos ressources », étude Elabe pour Veolia réalisée auprès de 14 000 personnes dans 28 pays (échantillons nationaux représentatifs de la population résidente âgée de 18 ans et + de chacun des 28 pays), décembre 2017. <https://challenge-of-resources.veolia.com/>



LA QUALITÉ DE L'AIR EN CHINE

C'est à partir de 2012 que la qualité de l'air est devenue une préoccupation majeure de la population, des entreprises et du gouvernement en Chine. De nombreuses initiatives individuelles et systémiques ont alors été prises, pour faire améliorer la qualité de l'air et le contrôle des données.

Sensibilisation croissante :

- En 2013, GreenPeace et Beijing University ont publié le rapport « *Dangerous Breath 2: Effect of PM2.5 on Chinese Urban Public Study* ». ¹² Les conclusions montraient alors que les PM2.5 avaient entraîné 257 000 décès dans 31 grandes villes de Chine.
- La campagne de sensibilisation « Air Warriors » lancée en 2014 par l'ONG de Zhao Liang a débouché sur une enquête menée auprès de 1 000 entreprises polluantes, mais aussi sur 600 projets d'amélioration environnementale et un programme d'investissement de 1,5 milliard de RMB. ¹³

Évolution de la perception du public :

- Selon une enquête publique menée en 2013 auprès des habitants de Shanghai ¹⁴, les réseaux sociaux sont le support de prédilection pour obtenir des informations sur la pollution atmosphérique (46,0 %), suivis de la télévision (40,3 %), d'Internet (39,9 %) et de la télévision mobile (38,4 %). Rares sont ceux qui appellent la hotline dédiée (0,6 %) ou utilisent une application (2,9 %).
- Comme indiqué dans la même enquête, 58 % des habitants de Shanghai se disent prêts à limiter ou à arrêter leurs activités en extérieur au cours d'un épisode de pollution et 27 % sont prêts à utiliser des équipements de protection.

- Depuis 2011, le secteur du e-commerce a enregistré une hausse importante des ventes d'équipements de protection (ex : masques, purificateurs d'air) en Chine. Entre novembre et décembre 2015, une période marquée par de nombreuses alertes, la vente de masques sur le site Alibaba a été pratiquement multipliée par dix ¹⁵.
- En 2016, les universités de Beijing et Yale ont publié un rapport selon lequel les citoyens chinois étaient prêts à payer 539 RMB par an, soit environ 3,8 % des revenus familiaux, pour réduire leur inhalation de PM2.5 de 1 mcg/m³. ¹⁶

Initiatives du gouvernement visant à améliorer les performances et la diffusion d'informations :

- Le contrôle de la qualité de l'air fait partie d'un système de suivi environnemental national. Celui-ci porte principalement sur l'air ambiant et le contrôle des émissions industrielles.
- Les informations officielles sur la pollution atmosphérique sont généralement diffusées par le ministère de l'Écologie et de l'Environnement, ainsi que par la Station de surveillance environnementale chinoise. Trois tâches sont prioritaires : diffusion de données en temps réel dans 338 villes, classement mensuel de la meilleure et de la pire qualité de l'air et prévisions sur la qualité de l'air plusieurs fois par mois. En 2019 ¹⁷, un net progrès a été constaté dans les 74 villes qui ont adopté des normes sur la qualité de l'air ambiant. Par rapport à 2013, les concentrations moyennes de PM2.5 et de SO₂ ont respectivement diminué de 42 et 68 %.

12 <https://www.greenpeace.org.cn/press-releasedangerous-breath-2/> «危险的呼吸2: 大气PM2.5对中国城市公众健康效应研究»

13 http://epaper.cenews.com.cn/html/2019-09/30/content_88022.htm

14 <https://max.book118.com/html/2018/0326/158823852.shtm>

15 <http://www.199it.com/archives/419969.html>

16 https://mp.weixin.qq.com/s/4Po_qmFzYo9TkUgANazlow

17 China Air Quality Improvement Report (2013-2018) http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/06/content_5397950.htm «中国空气质量改善报告 (2013-2018年)»

POURQUOI UNE TELLE ATTENTION ?

Une étude réalisée en 2019 auprès du grand public en France, en Belgique et dans l'agglomération de Shanghai ¹⁸ révèle que le lien entre santé et qualité de l'air est établi.

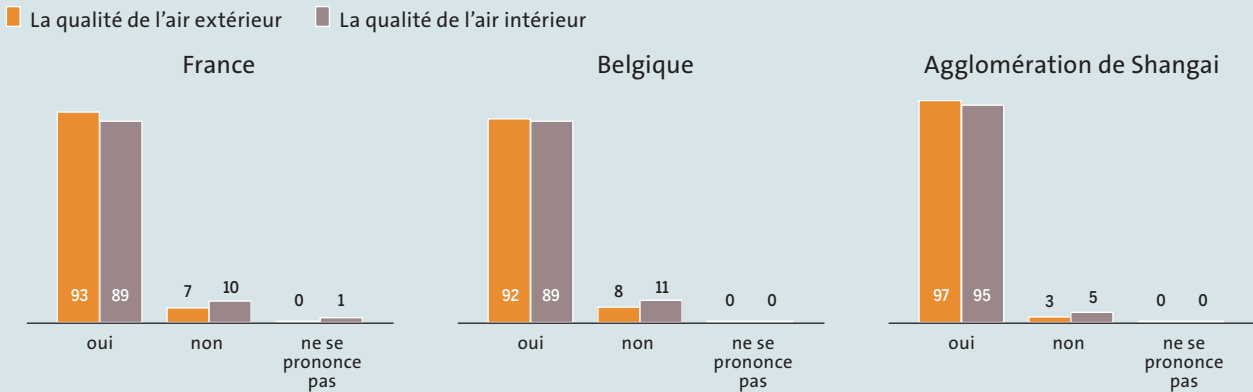
Les effets de l'air extérieur et les effets de l'air intérieur sur la santé sont jugés certains ou *a minima* probables par la plupart

des habitants, ce qui représente une écrasante majorité d'individus considérant que leur état de santé est impacté par la qualité de l'air qu'ils respirent, que ce soit dehors ou à l'intérieur des espaces clos.

18 « La qualité de l'air intérieur », étude Elabe pour Veolia réalisée en France, Belgique et dans l'agglomération de Shanghai, juin 2019. <https://www.veolia.com/fr/newsroom/dossiers-thematiques/ameliorer-qualite-air>

Étude ELABE 2019 sur les perceptions des Français, des Belges et des Chinois sur la qualité de l'air

D'après vous, la qualité de l'air que vous respirez a-t-elle un impact sur votre santé ?



Graphique 1

Cet alignement de l'opinion entre air ambiant et air intérieur est récent. La pollution de l'air intérieur est restée relativement méconnue de l'opinion publique jusqu'au début des années 2000, contrairement à celle de l'air extérieur, réglementée depuis des décennies et, surtout, davantage médiatisée. Ce rapprochement dans l'opinion a suivi une chronologie similaire à celle de l'intérêt porté par la communauté médicale pour l'air intérieur. Ce n'est que dans les années 90 que la pollution chimique et biologique de l'air des habitations devient une explication plausible de l'augmentation des maladies respiratoires auprès des pneumologues et allergologues¹⁹. Après des décennies de silence social, l'approche

environnementale de ces maladies commence à se diffuser et construit peu à peu l'existence publique de l'air intérieur.

Aujourd'hui, l'air intérieur est identifié comme une source possible de maux de tête, de fatigue, d'irritation des yeux et des voies respiratoires. Ces symptômes restent occasionnels pour une majorité d'Européens. Mais ils touchent, au moins de temps en temps, 29 % des Français à leur domicile, près de 2 Français sur 5 dans des lieux publics de loisirs, administratifs ou de santé, 1 Français sur 2 dans les transports en commun, et 43 % des actifs sur leur lieu de travail. En Belgique, les chiffres sont similaires.

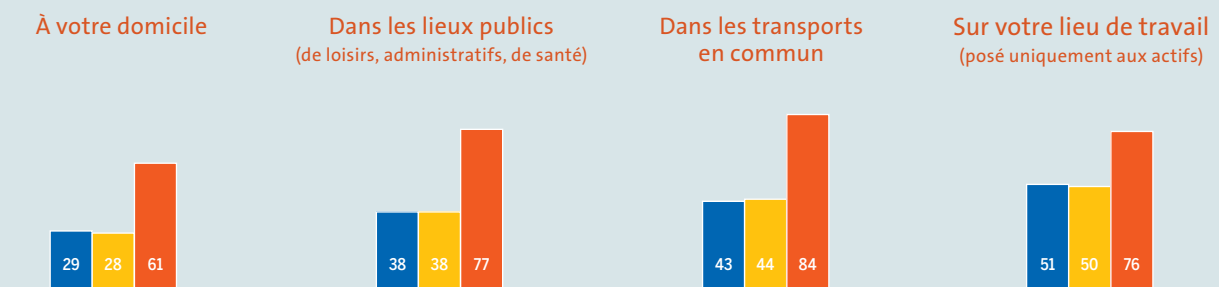
¹⁹« Entre expertise et contestation : la problématisation de l'air intérieur comme nouvelle menace environnementale et sanitaire », Céline Guilleux, 2011.

Étude ELABE 2019 sur les perceptions des Français, des Belges et des Chinois sur la qualité de l'air

Personnellement, avez-vous ressenti des effets de la pollution de l'air intérieur sur votre santé ?

■ France ■ Belgique ■ Agglomération de Shanghai

Pourcentage de réponses correspondant à « de temps en temps ou régulièrement »



Graphique 2

Dans l'agglomération de Shanghai, l'expérience de cette pollution est beaucoup plus fréquente : 61 % des habitants en ont déjà ressenti les effets à leur domicile, 3 sur 4 sur leur lieu de travail, 77 % dans les lieux publics et jusqu'à 84 % dans les transports en commun, dont 37 % régulièrement.

MAIS UN RISQUE ENCORE SOUS-ESTIMÉ

Entre la conscience de l'enjeu et la bonne information, il y a pourtant un pas qui n'est pas encore franchi.

En France, en Belgique et à Shanghai, on évalue mal le risque sanitaire, on sous-estime encore la pollution de l'air intérieur et on relativise ou on ignore les sources de pollution.

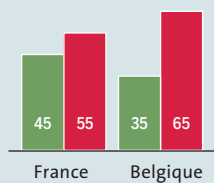
Qu'on ne s'y trompe pas, Français et Belges sont conscients de leurs approximations et erreurs : ils expriment d'une même voix le sentiment de manquer d'information en matière de prévention, de mesure et de réglementation applicable en matière de qualité de l'air intérieur.

Étude ELABE 2019 sur les perceptions des Français, des Belges et des Chinois sur la qualité de l'air

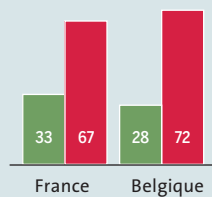
Au global, diriez-vous que vous êtes bien ou mal informé sur...

■ Bien informé ■ Mal informé

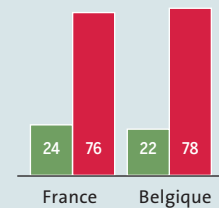
Les gestes à adopter pour améliorer la qualité de l'air intérieur



Les moyens techniques disponibles pour améliorer la qualité de l'air intérieur



Les réglementations applicables en matière de qualité de l'air intérieur dans les bâtiments



Graphique 3

LE RISQUE DE SUREXPOSITION À LA POLLUTION À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS EST MÉCONNU

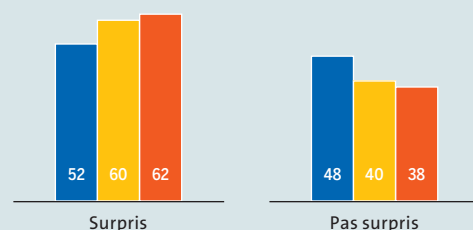
Respectivement 52 % des Français, 60 % des Belges et 62 % des résidents de l'agglomération de Shanghai sont surpris (dont 14 % à 16 % très surpris) d'apprendre que nous sommes davantage exposés à la pollution de l'air à l'intérieur de notre logement et des bâtiments que nous fréquentons qu'à l'extérieur. 2 % à 4 % sont même convaincus que cette information est fausse, et refusent d'y croire.



Étude ELABE 2019 sur les perceptions des Français, des Belges et des Chinois sur la qualité de l'air

De manière générale, nous sommes davantage exposés à la pollution à l'intérieur de notre logement et des bâtiments que nous fréquentons qu'à l'extérieur. Quelle est votre réaction par rapport à cette information ?

■ France ■ Belgique ■ Agglomération de Shanghai



Graphique 4

Sans accès à une évaluation objective de la qualité de l'air à l'intérieur des espaces clos fréquentés²⁰, le diagnostic se fait à l'intuition, au ressenti ou au filtre de la fonction anthropologique de l'habitat qui est d'abriter et de protéger. Partiaux, ce sont, en la matière, des conseillers peu fiables.

Le grand public établit schématiquement trois grandes catégories :

1/ Les lieux privés. Ils sont jugés relativement épargnés par la pollution. Plus l'espace est perçu « maîtrisé », personnel et sécurisant, plus l'air y est évalué de bonne qualité.

Le logement est le refuge le plus sûr (moins d'une personne sur quatre y juge l'air pollué). En effet, comment admettre que sa maison, son foyer est « empoisonné » (92 % des Français définissent le logement comme « un lieu où on se sent à l'abri »²¹). L'image universelle du logement protecteur est sans aucun doute un frein psychologique à la considération de ce lieu comme un espace de danger potentiel.

L'air à l'intérieur des hébergements ponctuels (hôtels, gîtes, chambres d'hôtes et locations de vacances) et du lieu de travail fait également l'objet d'une évaluation majoritairement positive, mais significativement plus fragile. Le doute y est plus fréquent.

2/ Les lieux ouverts, de passage. Bâtiments administratifs, centres commerciaux, lieux publics de loisirs, de santé, lieux d'éducation, maisons de retraites sont des espaces dont la qualité de l'air intérieur divise ou interroge. Et souvent on renonce même à se prêter à l'exercice du diagnostic, le ressenti ne suffisant plus. On admet tout simplement qu'on n'a pas les moyens d'évaluer la qualité de l'air dans ces lieux.

3/ Les transports (individuels ou collectifs). Ce sont des espaces dans lesquels une majorité est convaincue de respirer un air pollué.

²⁰ Environ 3 répondants sur 4 affirment être mal informés sur la qualité de l'air à l'intérieur des lieux qu'ils fréquentent.
« La qualité de l'air intérieur », étude Elabe pour Veolia réalisée en France, Belgique et dans l'agglomération de Shanghai, juin 2019.

²¹ « Enquête Conditions de vie et aspirations des Français », CREDOC, juin 2008.

La subjectivité du diagnostic est aggravée par la difficulté à identifier les sources de pollution de l'air intérieur.

55 % des Français et 62 % des Belges considèrent être mal informés sur les gestes à adopter pour améliorer la qualité de l'air intérieur, notamment sur les choix de produits et l'entretien. Et 37 % des Français, 31 % des Belges et 60 % des habitants de Shanghai jugent être seulement « plutôt bien informés ».

En la matière, l'approximation de l'information est mère de toutes les erreurs. Elle laisse le champ libre à l'intuition et au jugement des sens (odorat, vue).

Or, comment s'y fier quand on sait que le risque se niche jusque dans cette jolie bougie vendue pour « assainir » l'air, ou dans le pelage du félin offert au petit dernier après de longues négociations et désormais chéri par toute la famille ? Jeter l'anathème sur des objets domestiques n'est pas changement aisé.

La preuve en est qu'au jeu de l'identification des sources de pollution, il y a plus de perdants que de gagnants.

Les sources de pollution inodores ou « familières » sont de « faux amis », relativisés ou méconnus : l'idée fautive « n'est pas une source de pollution » ou la méconnaissance « je ne sais pas du tout si c'est une source de pollution » dépassent les 25 % (et jusqu'à 41 %) sur les matériaux d'isolation, les meubles en bois aggloméré ou contreplaqué et les animaux domestiques.

À l'inverse, ce qui génère des « odeurs » désagréables et ce qui peut s'apparenter à de la « saleté visible » ou de la « vétusté » est une source de pollution bien identifiée et redoutée : fumée de tabac, cheminées ou poêles mal entretenues, moisissures, appareils de chauffage, chaudières, chauffe-eaux vétustes ou mal entretenus et colles sont majoritairement identifiés comme des sources importantes de pollution.

Entre ces deux catégories, de nombreuses sources sont identifiées mais relativisées car jugées peu importantes : désodorisants d'intérieur, produits ménagers, peintures, revêtements pour les murs et les sols, poussière, acariens, bougies, encens et parfums d'ambiance.



QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DANS LES ÉCOLES EN FRANCE : INQUIETS, LES PARENTS VEULENT SAVOIR²²

UN ENJEU DE SANTÉ PUBLIQUE POUR LES FRANÇAIS, UNE INQUIÉTUDE POUR LES PARENTS

Conscients des effets sur leur santé de la qualité de l'air intérieur, les Français établissent naturellement ce même lien entre santé des enfants et qualité de l'air qu'ils respirent à l'intérieur des écoles (86 %, dont 43 % en sont certains et 43 % le jugent probable).

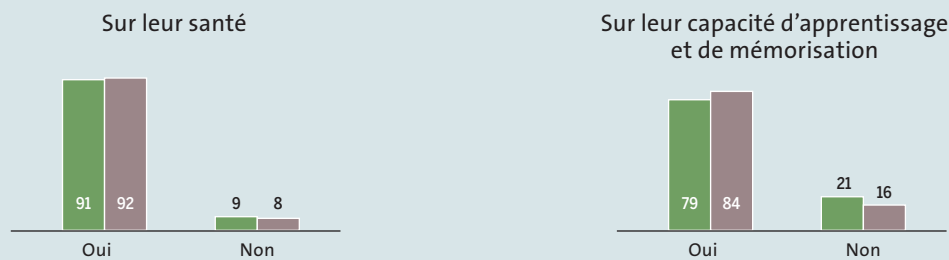
Bien qu'avec un peu plus d'hésitation, 7 Français sur 10 lui attribuent également un impact sur la capacité d'apprentissage et de mémorisation des enfants (71 %, dont 27 % en sont sûrs, et 44 % le jugent probable).

Directement concernés par la qualité de l'environnement d'apprentissage de leurs enfants, les parents sont encore plus nombreux à faire ces liens.

Étude ELABE 2019 sur les parents et la qualité de l'air intérieur dans les écoles (septembre 2019)

D'après vous, la qualité de l'air que les enfants respirent à l'intérieur des écoles a-t-elle un impact ?

■ Parents d'enfants mineurs ■ Parents d'enfants de moins de 6 ans



Graphique 5

Sujet d'attention pour la plupart des parents, la qualité de l'air à l'intérieur de la crèche, de l'école, du collège ou du lycée de leur(s) enfant(s) est même un sujet d'inquiétude pour près de 6 parents sur 10 (59 %). L'inquiétude est d'autant plus vive que l'enfant scolarisé est jeune, et donc vulnérable (66 % des parents d'enfants de moins de 6 ans se déclarent inquiets de la qualité de l'air intérieur de la crèche ou de l'école, dont 17 % très inquiets).

DÉPOURVUS D'INFORMATION, LES PARENTS VEULENT SAVOIR

Cette inquiétude est alimentée par le défaut d'information : 81 % des parents d'enfants de moins de 18 ans considèrent qu'ils sont mal informés sur la qualité de l'air à l'intérieur de l'établissement où leur enfant est scolarisé, dont 38 % très mal informés.

Un sentiment de carence confirmé par l'incapacité d'1 parent sur 3 à produire un diagnostic, même approximatif, de la qualité de l'air que respire(nt) leur(s) enfant(s) à l'intérieur de leur école : 33 % affirment n'avoir aujourd'hui aucun moyen de connaître la situation. Et si 67 % se prêtent à l'exercice d'évaluation, cette évaluation est le plus souvent hésitante et prudente : 39 % des parents pensent que l'air à l'intérieur de l'école de leur(s) enfant(s) est plutôt de bonne qualité, mais 23 % pensent qu'il est plutôt de mauvaise qualité. Sans information, le doute s'installe, l'inquiétude monte, peut-être irrationnelle et sans fondement dans bien des cas. Mais elle est là.

Le premier combat à mener en matière de qualité de l'air intérieur est donc celui du « moyen de savoir », en coupant court au doute : 83 % affirment qu'en tant que parent, il est important pour eux d'avoir accès à une évaluation de la qualité de l'air que leurs enfants respirent (dont 30 % très important).

²² « Les parents et la qualité de l'air intérieur dans les écoles », étude ELABE pour Veolia, septembre 2019.
<https://elabe.fr/les-francais-et-la-qualite-de-lair-interieur-dans-les-ecoles/>

CONCLUSION

L'écart entre la conscience de la menace sanitaire et l'accès à l'information minimale (L'air que je respire est-il de qualité ? Dois-je mettre en place ou puis-je exiger la mise en place de mesures préventives ou correctives ?) souligne l'acuité de l'enjeu d'information et de prévention.

Français, Belges et habitants de Shanghai ne s'y trompent pas, convaincus que l'information sur les sources de pollution et les gestes à adopter est un levier essentiel pour améliorer la qualité de l'air intérieur (90 % considèrent que c'est important, dont 39 % très important).

Mais l'information et la modification des pratiques individuelles ne suffisent pas.

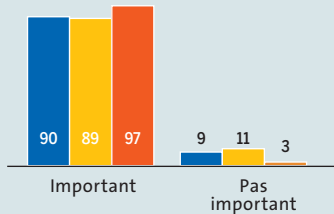
Le grand public considère que l'air intérieur ne se réduit pas à un problème domestique de la responsabilité des seuls individus. Le renforcement réglementaire et normatif est jugé indispensable. Tout comme l'action collective et l'implication de l'ensemble des acteurs de la qualité de l'air intérieur, de la construction à la régulation.

Étude ELABE 2019 sur les perceptions des Français, des Belges et des Chinois sur la qualité de l'air

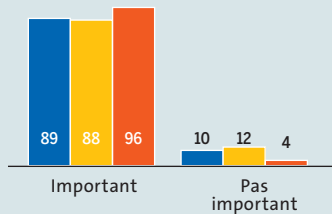
Selon vous, quelle est l'importance de chacun des leviers suivants pour améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments ?

■ France ■ Belgique ■ Agglomération de Shanghai

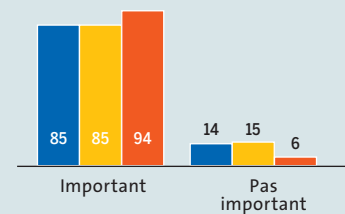
L'information sur les sources de pollution et les gestes à adopter pour améliorer la qualité de l'air intérieur



Les solutions et innovations technologiques



Les réglementations applicables en matière de qualité de l'air intérieur



Graphique 6



Et selon vous, quelle est l'importance de chacun des acteurs suivants pour améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments ?

Pourcentage de l'importance du rôle des différents acteurs pour améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments	France	Belgique	Agglomération de Shanghai
Les entreprises qui gèrent les systèmes d'aération et de chauffage des bâtiments	89	90	95
Les constructeurs immobiliers	88	86	93
L'État	85	85	96
Les professionnels de santé	85	85	83
Les fabricants (ameublement, décoration, construction, produits ménagers)	85	81	95
Les distributeurs (ameublement, décoration, construction, produits ménagers)	81	74	90
Les installateurs et les artisans	86	84	85
Les collectivités locales	81	77	88
Les associations de consommateurs	79	74	83
Mon employeur (<i>posé uniquement aux salariés</i>)	69	77	88

ÉTUDE ELABE 2019 SUR LES PERCEPTIONS DES FRANÇAIS, DES BELGES ET DES CHINOIS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET ÉTUDE ELABE 2019 SUR LES PARENTS ET LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DANS LES ÉCOLES

Enquêtes	Perception de la qualité de l'air intérieur Enquête 1 : Les Français et la qualité de l'air intérieur	Perception de la qualité de l'air intérieur Enquête 2 : Les Belges et la qualité de l'air intérieur	Perception de la qualité de l'air intérieur Enquête 3 : Les habitants de Shanghai et la qualité de l'air intérieur	Qualité de l'air à l'intérieur des écoles
Panel	Échantillon de 1 063 personnes, représentatif des habitants de la France continentale âgés de 18 ans et plus. Méthode des quotas appliquée aux critères de genre, âge, statut socio-professionnel, aux niveaux municipal et régional.	Échantillon de 1 056 personnes, représentatif des habitants de la Belgique, âgés de 18 ans et plus. Méthode des quotas appliquée aux critères de genre, âge, statut socio-professionnel, aux niveaux municipal et régional.	Échantillon de 1 001 personnes, représentatif des habitants de Shanghai, âgés de 18 ans et plus. Méthode des quotas appliquée aux critères de genre et d'âge.	Échantillon de 1 010 personnes, représentatif des habitants de la France métropolitaine âgés de 18 ans et plus, et un suréchantillon de 351 parents ayant des enfants de moins de 18 ans, soit un échantillon total de 1 361 personnes, dont 607 parents d'enfants mineurs. Méthode des quotas appliquée aux critères de genre, âge, statut socio-professionnel, aux niveaux municipal et régional.
Distribution	Enquêtes en ligne			
Dates	Du vendredi 12 au lundi 15 avril 2019	Du mercredi 24 avril au mercredi 1 ^{er} mai 2019	Du jeudi 2 mai au lundi 13 mai 2019	Du mardi 3 au mercredi 4 septembre 2019

UN EFFORT MULTIPARTITE ET MONDIAL POUR LUTTER CONTRE LA POLLUTION DE L'AIR DANS LE MONDE

Helena Molin Valdés,
Responsable du Secrétariat Général de la Coalition pour le Climat et l'Air Pur



Les cuisinières mal entretenues sont l'une des sources de pollution intérieure des habitations

Helena Molin Valdés dirige le Secrétariat Général de la Coalition pour le climat et l'air pur (CCAC) au bureau du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) à Paris, poste qu'elle occupe depuis 2013. Helena est une dirigeante expérimentée du système des Nations Unies. Elle a été cadre supérieur au Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNISDR), où elle a dirigé des travaux sur la résilience, la réduction des risques de catastrophe, le développement durable et les questions liées au changement climatique. Elle a été directrice régionale de l'UNISDR pour l'Amérique latine et les Caraïbes et a travaillé avec l'Organisation panaméricaine de la santé sur l'atténuation des effets des catastrophes dans les hôpitaux et la préparation aux catastrophes. Avant de rejoindre l'ONU, Helena était architecte, planificatrice et directrice d'une ONG suédoise basée en Amérique centrale. Cette ONG se consacrait à des projets communautaires et au développement de technologies telles que la production de briques améliorées et d'équipements de cuisson, en partenariat avec l'Université de Lund.

La Coalition pour le climat et l'air pur (CCAC) est une initiative qui réunit des gouvernements, des organisations internationales, des instituts de recherche ainsi que des membres de la société civile et du secteur privé. Ensemble, ces acteurs s'engagent à lutter contre le changement climatique et à améliorer la qualité de l'air au cours des prochaines décennies en intervenant auprès de différents secteurs pour réduire les polluants climatiques à courte durée de vie¹ (PCDV) comme le noir de carbone, le méthane, les hydrofluorocarbures (HFC) ou l'ozone troposphérique.

La CCAC fait office de catalyseur en faisant connaître et en mettant en œuvre des solutions immédiates pour lutter contre ces polluants. Elle s'efforce ainsi de déterminer, de promouvoir et d'appuyer les meilleures initiatives et les meilleurs projets en matière de qualité de l'air.

Cet article présente plusieurs projets d'amélioration de la qualité de l'air dans des régions rurales et défavorisées :

- En Mongolie, la CCAC a fourni une assistance technique à la banque mongole XacBank, afin d'étudier des technologies de chauffage améliorées et abordables telles que l'énergie électrique et solaire ;
- Au Nigeria, la CCAC soutient une association de femmes qui a créé un réseau de femmes entrepreneurs déterminées à fournir des solutions d'énergie propre abordables à travers le pays ;
- En Suède et au Chili, une campagne de sensibilisation a été lancée sur une plateforme en ligne parrainée par la CCAC. Cette plateforme présente aux utilisateurs de poêles à bois quelques étapes simples pour optimiser leur production de chaleur issue de combustibles solides, ce qui leur permet d'économiser la moitié du combustible et de réduire les émissions nocives ;
- La CCAC a soutenu la « Gold Standard Foundation » dans la création d'une méthodologie de surveillance et d'une norme ISO spécifiques pour les foyers de cuisson. Objectif : améliorer l'accès aux marchés de financement du carbone et rendre les poêles plus abordables.

La pollution intérieure étant directement liée à la pauvreté, elle touche principalement les populations les plus vulnérables (femmes et enfants). Les initiatives améliorant la qualité de l'air intérieur doivent donc être considérées comme une priorité mondiale.

¹ Les polluants climatiques à courte durée de vie sont de puissants facteurs climatiques qui restent dans l'atmosphère beaucoup moins longtemps que le dioxyde de carbone (CO₂), mais dont le potentiel de réchauffement de l'atmosphère peut être plusieurs fois supérieur. Les principaux sont le noir de carbone, le méthane, l'ozone troposphérique et les hydrofluorocarbures.

Qu'est-ce que la Coalition pour le climat et l'air pur et quel est son rôle en matière de qualité de l'air ?

Helena Molin Valdés : La Coalition pour le climat et l'air pur (CCAC) est un partenariat volontaire de gouvernements, d'organisations intergouvernementales, d'entreprises, d'institutions scientifiques et d'organisations de la société civile qui œuvrent à améliorer la qualité de l'air et à protéger le climat par des mesures visant à réduire les polluants climatiques à courte durée de vie² (PCDV).

Ce réseau mondial, créé en 2012, regroupe actuellement plus de 140 partenaires, institutionnels ou non, et des centaines d'acteurs locaux du secteur privé. Il favorise et supporte une action rapide, tout en ayant des répercussions positives sur plusieurs fronts : climat, santé publique, efficacité énergétique et sécurité alimentaire.

La Coalition aide ses partenaires et parties prenantes à élaborer des politiques et des pratiques visant à réduire considérablement les émissions de polluants climatiques à courte durée de vie. Elle soutient des actions sur le terrain par le biais de 11 initiatives à fort potentiel de changement dans

des secteurs spécifiques ou dans le cadre d'efforts transversaux visant à réduire la pollution atmosphérique :

- Sept initiatives se concentrent sur des secteurs spécifiques (véhicules lourds, pétrole et gaz, déchets, construction, hydrofluorocarbures et climatisation, énergie domestique et agriculture) afin d'identifier les moyens les plus efficaces et les plus pratiques de réduire leurs émissions. Elles comprennent des actions de formation et de renforcement institutionnel ; l'appui à l'élaboration de lois, de réglementations, de politiques et de programmes ; la démonstration de technologies ; de la sensibilisation politique, des campagnes de sensibilisation du grand public, du cofinancement et opérations de financement à effet de levier ; le développement de ressources et d'outils de connaissances. La Coalition travaille en étroite collaboration avec les communautés concernées, les représentants de l'industrie, les ONG et les décideurs pour soutenir des améliorations ciblées en matière de technologie, de pratiques et de politiques.
- Quatre autres initiatives mènent des travaux trans-sectoriels afin d'accélérer la réduction des émissions pour tous les polluants climatiques à courte durée de vie (initiative SNAP³, finance, évaluations, santé).

² Les polluants climatiques à courte durée de vie sont de puissants facteurs climatiques qui restent dans l'atmosphère beaucoup moins longtemps que le dioxyde de carbone (CO₂), mais dont le potentiel de réchauffement de l'atmosphère peut être plusieurs fois supérieur. Les principaux sont le noir de carbone, le méthane, l'ozone troposphérique et les hydrofluorocarbures.

³ SNAP: « Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants ». L'initiative SNAP de la Coalition est un programme collaboratif qui se donne pour objectif de soutenir les mesures des pays partenaires de la Coalition, afin de déployer des actions de façon coordonnée et en établissant certaines priorités.



- En complément, toutes les activités de la Coalition respectent seize mesures (identifiées dans le cadre d'une évaluation réalisée en 2011 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)⁴ visant à réduire le noir de carbone⁵ et le méthane et à favoriser des solutions de remplacement des hydrofluorocarbures (HFC) dans le secteur du refroidissement. Ces mesures ciblent les principaux secteurs responsables des émissions de pollution climatique à courte durée de vie. Remplacement des poêles à bois et des brûleurs par des poêles à granulés ; interdiction de la combustion en plein champ des déchets agricoles ; récupération et utilisation des gaz et des émissions fugitives lors de la production de pétrole et de gaz naturel ; amélioration du traitement des eaux usées par la récupération des gaz et le contrôle des débordements, etc. ; sont autant de mesures que la Coalition encourage. Près de la moitié de ces mesures pourraient avoir des retombées positives sur la qualité de l'air, la santé humaine, les écosystèmes et la sécurité alimentaire. Si elles sont mises en œuvre à l'échelle mondiale d'ici 2030, ces mesures pourraient réduire les émissions mondiales de méthane jusqu'à 40 % et les émissions mondiales de noir de carbone jusqu'à 80 % par rapport à un scénario de référence, évitant jusqu'à 0,5 °C de réchauffement⁶.
- La Coalition a également mis sur pied un Centre de solutions⁷ visant à fournir des ressources, du matériel de formation et des conseils d'experts sur une gamme de mesures et de politiques visant à réduire les émissions de polluants climatiques de courte durée (lignes directrices et outils, webinaires et formation, aide d'experts, bibliothèque de ressources).

Aujourd'hui, 3 milliards de personnes, soit plus de 40 % de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à un éclairage, à des combustibles et à des technologies propres dans leurs foyers

Quels sont les risques liés à la qualité de l'air intérieur, notamment pour les plus pauvres, mais aussi pour l'environnement ?

H. M. V. : La pollution de l'air intérieur a un impact direct sur la santé. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la pollution atmosphérique en général est responsable de 7 millions de décès prématurés par an. Plus de la moitié d'entre eux (3,8 millions) peuvent être attribués à l'exposition à des appareils domestiques mal entretenus comme des cuisinières, des poêles et des chaudières. La principale raison de la pollution de l'air intérieur est en effet l'utilisation du kérosène, du charbon, du bois et d'autres sources de biomasse pour la cuisson, le chauffage et l'éclairage. Aujourd'hui, 3 milliards de personnes, soit plus de 40 % de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à un éclairage, à des combustibles et à des technologies propres dans leurs foyers.

4 https://library.wmo.int/index.php?vl=notice_display&id=12414#.XWK29CgzaUk.

5 Le noir de carbone contribue de façon importante au réchauffement climatique, avec ses particules formées par la combustion incomplète de combustibles fossiles, de bois et d'autres matériaux. Si la combustion était complète, le carbone du combustible serait transformé en dioxyde de carbone (CO₂), mais celle-ci n'est jamais complète et le CO₂, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, le carbone organique et les particules de noir de carbone sont formés au cours de ce processus.

6 Évaluation intégrée sur le noir de carbone et l'ozone troposphérique, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et Organisation météorologique mondiale (OMM), 2011.

7 <https://www.ccacoalition.org/en/solution-centre>

L'OMS surveille la pollution de l'air dans les ménages depuis plus d'une décennie et, bien que le taux d'accès aux combustibles et aux technologies propres augmente partout, les améliorations ne suivent pas le rythme de la croissance démographique dans de nombreuses régions du monde, notamment en Afrique subsaharienne. En outre, certaines personnes sont plus exposées que d'autres et subissent davantage les effets de cette pollution. Il s'agit notamment des femmes, des enfants et des personnes âgées, puisque ces publics passent plus de temps à la maison. Plus nous examinons les effets de la pollution de l'air intérieur sur la santé, plus nous nous rendons compte que le problème est beaucoup plus grave qu'on ne le pensait auparavant. Nous savons aujourd'hui que l'une des solutions pour améliorer la santé est de veiller à ce que les gens aient accès à une énergie domestique propre. La pollution de l'air à l'intérieur des habitations est aussi une question de justice et de genre. Très souvent, la pollution de l'air à l'intérieur des habitations est liée à la pauvreté, notamment énergétique, et nous savons que les femmes et les filles sont touchées en premier lieu :

- La collecte des combustibles et les risques associés à l'utilisation de certaines technologies traditionnelles ont des conséquences sur les moyens de subsistance. L'utilisation du kérosène, par exemple, expose à des risques majeurs tels que l'empoisonnement, les incendies et les explosions. Le recours à ces technologies polluantes de cuisson, de chauffage et d'éclairage contribue également à la pollution de l'air extérieur. L'Objectif de développement durable n° 7⁸ entend, « d'ici à 2030, garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable ». Il a également été démontré que les nouveaux poêles à bois déployés dans les pays à revenu élevé contribuent eux aussi de façon significative à la pollution de l'air à l'intérieur et à l'extérieur, et peuvent avoir des effets néfastes sur la santé.
- La cuisson expose les femmes et les enfants (qui se trouvent souvent aux côtés de leurs mères quand elles font la cuisine) à des émissions nocives : en effet, la cuisson domestique et le chauffage constituent 58 % du total des émissions mondiales de noir de carbone ;
- Les enfants qui utilisent des lampes au kérosène hautement polluantes pour faire leurs devoirs s'exposent à des risques à long terme pour la santé, alors qu'ils essaient justement de se forger un avenir meilleur ;
- La collecte du bois de combustion est une activité à risque pour les femmes, car ces dernières s'exposent à différents dangers tels que la violence (y compris sexuelle) et la maltraitance ;
- Les émissions de particules provenant des cuisinières et des poêles mal entretenus perturbent les processus météorologiques qui déclenchent les précipitations dont des millions de personnes dépendent pour s'approvisionner en eau potable et pour irriguer leurs cultures. La collecte de bois pour la cuisson et le chauffage ainsi que la production de charbon de

8 Investir dans les énergies solaire, éolienne et thermique, améliorer la productivité énergétique et assurer l'accès à l'énergie pour tous est essentiel si nous voulons atteindre l'ODD 7 d'ici 2030. L'extension des infrastructures et la modernisation des technologies afin de fournir une énergie propre et plus efficace dans tous les pays encourageront la croissance et aideront l'environnement.

bois contribuent à la dégradation des forêts et aux changements d'affectation des terres.

L'autre aspect de la pollution de l'air intérieur à prendre en compte à l'échelle mondiale est son impact sur le climat. Nous savons que les cuisinières et les poêles sont les principales sources d'émission de noir de carbone, qui a un effet majeur sur le climat à l'échelle mondiale et locale. Le noir de carbone contribue de façon importante au réchauffement, car il absorbe la lumière et réchauffe son environnement. Par unité de masse, le noir de carbone a un impact sur le climat 460 à 1 500 fois plus puissant que le dioxyde de carbone (CO₂). Lorsqu'il se dépose sur la glace et la neige, le noir de carbone réduit leur capacité à réfléchir la lumière du soleil, et réchauffe donc la surface. Les régions arctiques et glaciaires comme l'Himalaya sont particulièrement vulnérables à la fonte des glaces, ce qui menace l'approvisionnement en eau de milliards de personnes. Dans les pays de l'Arctique, des campagnes ont été mises en œuvre pour sensibiliser la population aux effets des émissions d'origine domestique sur la pollution atmosphérique locale.

Alors que de nombreux acteurs nationaux et internationaux s'emploient déjà à relever le défi majeur consistant à transformer la manière dont des milliards de personnes dans le monde cuisinent leurs aliments, chauffent et éclairent leurs foyers ; les PCDV⁹ restent pour la plupart absents des efforts en cours, et peu de projets d'atténuation du changement climatique prennent en compte le facteur santé. Ainsi, les cuisinières et les poêles mal entretenus représentent un gisement, conséquent mais encore largement inexploité, pour atténuer les émissions de PCDV et avoir des impacts bénéfiques sur la qualité de l'air, le climat, l'environnement, la société et l'économie.

La CCAC tente de résoudre le problème de diverses façons, notamment en aidant les pays du monde à saisir les opportunités permettant de limiter les émissions de noir de carbone et la pollution de l'air. Cette année, avec plusieurs partenaires, la Coalition a lancé une étude visant à étudier les liens entre émissions et exposition.

Selon vous, que pouvons-nous faire pour améliorer la qualité de l'air ?

H. M. V. : Il est essentiel d'améliorer l'accès à l'énergie propre pour 3 milliards de personnes. En utilisant les énergies renouvelables sur les petits réseaux de distribution locaux, les populations pourront progressivement abandonner les combustibles fossiles et polluants.

La CCAC a collaboré avec des banques de développement et des institutions de microfinancement en vue d'élaborer des programmes de soutien aux collectivités pauvres et leur permettre d'avoir accès à l'énergie renouvelable.

Un exemple est celui de XacBank, en Mongolie. Dans ce pays, la fumée issue de la combustion du charbon et du bois est l'un des principaux facteurs responsables de la pollution de l'air par le noir de carbone et les PM_{2,5}. C'est ce qui fait d'Oulan-Bator, la capitale, l'une des villes les plus polluées au monde. La Coalition fournit une aide technique à la banque mongole XacBank pour étudier des technologies de chauffage améliorées et abordables, comme l'électricité et le solaire. En partenariat avec la Frankfurt School of Finance & Management, la Coalition soutient également une étude de faisabilité qui conseillera XacBank pour la conception d'un produit financier destiné aux familles pauvres, qui devrait les aider à opter pour des technologies de chauffage moins polluantes.

Il est essentiel de créer les conditions nécessaires pour parvenir à une combustion efficace. Pour cela, il existe déjà des solutions concrètes : dans les régions où l'accès aux combustibles alternatifs ou aux énergies renouvelables est limité, l'installation de cuisinières plus efficaces permet de résoudre en partie le problème de la pollution de l'air intérieur et peut également contribuer à atténuer les effets sur le climat. Ces cuisinières assurent une combustion plus

efficace et adéquate des combustibles solides, pour une cuisson moins polluante et moins gourmande en combustible.

Autre point important : l'éclairage domestique. Selon la Banque mondiale, environ 101 millions de personnes (sur 212 millions) au Nigeria n'ont pas accès au réseau électrique. Dans les zones rurales, seuls 34 % des Nigériens ont accès au réseau. La plupart des gens utilisent des lampes à kérosène, des bougies et des torches pour s'éclairer. Pourtant, ce type d'éclairage pourrait être facilement remplacé par un éclairage solaire bon marché. Au Nigeria, un groupe de femmes, les Rural Women for Energy Security (RUWES), s'efforce de lutter contre la pollution de l'air dans les zones rurales. Cette confrérie de plus de 2 millions de femmes nigérianes joue un rôle majeur dans la prise de décision des ménages dans ce domaine, en créant des entreprises énergétiques propres, en formant des femmes à la fabrication et à l'entretien de cuisinières à énergie propre et de systèmes solaires ; et en constituant un réseau de femmes en vue de fournir à tout le pays des solutions énergétiques propres abordables. RUWES a ainsi créé un marché viable et une chaîne d'approvisionnement durable pour les technologies énergétiques propres, a procuré une source de revenus aux femmes en les aidant à devenir des entrepreneurs du secteur de l'énergie propre, et approvisionne en énergie propre des habitations et de petites entreprises. Cette confrérie aide aussi les femmes à obtenir des financements pour la création d'entreprises. D'ici 2020, RUWES espère fournir 20 millions de cuisinières propres dans les six régions géopolitiques du Nigeria.

Cependant, il faut prendre en compte le contexte économique très difficile de ces projets : les destinataires sont des ménages pauvres, aux revenus faibles, qui n'ont quasiment pas d'accès au marché de l'emploi et ne peuvent donc acheter de nouveaux équipements, même si leur foyer est raccordé au réseau électrique. Parfois, certains refusent aussi de changer leurs habitudes culinaires ou de chauffage pour des raisons

La pollution de l'air à l'intérieur des habitations est aussi une question de justice et de genre. Très souvent, la pollution de l'air à l'intérieur des habitations est liée à la pauvreté, notamment énergétique, et nous savons que les femmes et les filles sont touchées en premier lieu

⁹ Polluants climatiques à courte durée de vie.

culturelles. Changer la façon dont des milliards de personnes dans le monde cuisinent leurs aliments, chauffent et éclairent leur foyer est donc une tâche très difficile, sachant que les aides financières accordées à ce secteur restent très insuffisantes.

Enfin, la CCAC essaie d'aider les dirigeants à prendre conscience des possibilités que représente le secteur pour réduire les émissions de noir de carbone et, par conséquent, contribuer à la lutte contre le changement climatique.

Selon vous, quelles sont les meilleures politiques publiques et pratiques environnementales en matière de pollution de l'air intérieur et d'efficacité énergétique (hors pays développés) ?

H. M. V. : Certains pays ont mis en œuvre des politiques publiques efficaces et ambitieuses : la campagne « *Santiago Respira* » (Santiago respire) au Chili ¹⁰ montre ce qui peut être accompli avec le soutien de l'opinion publique et l'envie de mettre en place un programme de « dépollution ». Autre exemple de politique publique efficace : l'ambitieux programme

¹⁰ « Santiago Respira » entend améliorer la qualité de l'air intérieur via des solutions qui ciblent plusieurs secteurs, comme l'énergie, le transport et la gestion des déchets.

*Clean Cook stove Program Peru*¹¹, qui a permis la distribution de nouveaux poêles.

En Asie et en Afrique, l'adoption de cuisinières plus efficaces et moins polluantes est plus lente. Certaines initiatives méritent toutefois d'être soulignées : le Kenya représente actuellement le premier marché mondial pour les cuisinières améliorées, grâce au développement d'une série d'entreprises innovantes en plein essor. *Koko Networks*, par exemple, est une société de technologie soutenue par du capital-risque qui opère en Afrique de l'Est et en Inde. Elle construit et déploie un réseau dense de « *KOKOpoints* » connectés à un cloud dans des magasins de proximité, qui servent de points de retrait pour les biens et services des principaux fournisseurs du pays. Le réseau distribue du gel d'éthanol pour la cuisson, une solution économique qui améliore la qualité de vie. Parallèlement, un certain nombre d'entreprises, comme *Envirofit*¹², utilisent des méthodes de paiement à la carte¹³ grâce auxquelles utilisateurs et distributeurs peuvent suivre et surveiller leur consommation de gaz, afin de rendre cette dernière abordable pour les personnes à faibles revenus et issues de la classe moyenne.

¹¹ Clean Cook stove Program Peru a déjà permis à plus de 107 000 familles péruviennes de recevoir une nouvelle cuisinière.

¹² Envirofit International est une entreprise sociale qui conçoit des projets et des services intelligents autour de l'énergie, visant à améliorer la qualité de vie à l'échelle mondiale.

¹³ En payant via un téléphone mobile la quantité de gaz à utiliser pour une période donnée ou « Pay As You Cook ».



Des femmes du Rural Women for Energy Security (RUWES) au Nigeria, avec des cuisinières propres

Les gouvernements peuvent également soutenir la transition énergétique en transférant les subventions accordées aux combustibles polluants (comme le kérosène et le charbon) vers le solaire, les biocarburants, le biogaz¹⁴, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et autres solutions plus écologiques.

La réforme du GPL en Inde est une rare réussite. Le pays a mené de nombreuses réformes dans le domaine – contraignant – des subventions énergétiques. *PaHaL*¹⁵, la subvention indienne accordée au gaz de cuisine, est le plus important programme de transfert direct de bénéfices au monde. *PaHaL* a permis d'accroître l'efficacité de l'ancien système qui reposait sur des subventions en nature, et de réduire les fuites. Ainsi, le gouvernement a pu réaliser d'importantes économies fiscales à peu de frais. Grâce à cette marge de manœuvre budgétaire supplémentaire, il a favorisé le développement rapide de ce combustible de cuisson propre, en particulier pour les ménages ruraux pauvres qui étaient auparavant exclus du réseau du GPL. Ce faisant, il réduit l'exposition à la pollution de l'air dans les ménages, ce qui a des effets bénéfiques à long terme sur la santé, en particulier celle des femmes et des filles des régions rurales.

Quelles ont été les initiatives les plus importantes et les plus novatrices du secteur privé/associatif en matière de qualité de l'air intérieur au cours des dernières années ?

H. M. V. : Au cours des dernières années, de nombreuses initiatives en matière de technologies renouvelables visant à réduire le prix des systèmes d'éclairage solaire ont été développées et déployées, en particulier dans les zones rurales pauvres en énergie. Dans de nombreuses régions, il sera essentiel de travailler à l'amélioration de l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, tout en réduisant le prix de ces systèmes, pour réduire la pollution de l'air intérieur.

D'autres initiatives émergent autour des mécanismes de financement du carbone et du climat et des systèmes de financement innovants développés avec les fabricants, les banques et d'autres institutions financières, pour financer les technologies d'énergie domestique propre. La CCAC a appuyé la création d'une méthodologie de surveillance du noir de carbone par la Gold Standard Foundation, afin permettre aux poêles plus efficaces d'accéder aux marchés de financement du carbone et de devenir plus abordables. En effet, les fabricants de poêles ont besoin des subventions de la finance du carbone pour faire baisser le prix de ces technologies.

Certaines entreprises répondent au problème de la pollution atmosphérique par l'innovation : IKEA a créé en 2019 un rideau qui absorbe la pollution atmosphérique¹⁶. Ce rideau fait appel à une technologie développée en partenariat avec des universités d'Europe et d'Asie, ainsi que des fournisseurs et des designers d'IKEA. Son fonctionnement rappelle la photosynthèse, étant activé par la lumière extérieure et intérieure. Il s'agit clairement d'une solution de marché haut de gamme, qui ne résout pas les problèmes des ménages les plus pauvres.

Nexleaf Analytic est une entreprise sociale qui utilise l'innovation pour lutter contre la pollution atmosphérique. Cette entreprise technologique à but non lucratif mise sur une approche ascendante, avec des solutions basées sur les données, pour répondre aux questions de santé publique et de changement climatique dans les pays à revenu faible et intermédiaire. L'entreprise construit et utilise des capteurs reliés par le cloud, des tableaux de bord offrant des visualisations et des outils d'analyse personnalisables conçus pour aider ses partenaires à surveiller l'adoption de technologies de cuisson améliorées et à accéder aux crédits de financement climatique. L'entreprise a notamment conçu et installé StoveTrace dans plus de 700 foyers en Inde, un système de télésurveillance via le cloud qui propose des cuisinières améliorées aux foyers ruraux et qui mesure la fréquence d'utilisation de ces appareils. Ces données sont utilisées par les fabricants de poêles pour mieux comprendre les utilisations de leurs produits. Les données permettent également le paiement des ménages via les marchés et les fonds carbone qui subventionnent et encouragent l'utilisation de poêles plus propres.

Il existe un marché croissant pour les produits qui protègent les populations contre la pollution de l'air extérieur et intérieur. Cependant, une simple protection ne suffit pas. Il est nécessaire que le secteur privé innove pour nous éloigner des technologies polluantes, mais aussi des modèles commerciaux et des chaînes de production polluantes, et ce le plus rapidement possible. La décarbonisation et l'adoption de formes d'énergie à faibles émissions (que ce soit pour le transport ou la production d'énergie), tout au long

du cycle de vie des technologies associées, sont désormais les conditions d'une bonne santé publique.

La décarbonisation et l'adoption de formes d'énergie à faibles émissions (que ce soit pour le transport ou la production d'énergie), tout au long du cycle de vie des technologies associées, sont désormais les conditions d'une bonne santé publique

¹⁴ Qui peut être produit localement à partir du fumier et des déchets organiques via des bio-digesteurs.

¹⁵ Pratyaksh (Direct) Hastantarit (Transfert) Labh (Avantage) en hindi.

¹⁶ https://www.ikea.com/us/en/about_ikea/newsitem/021919-IKEA-GUNRID-curtain

CORÉE DU SUD : DES POLITIQUES PUBLIQUES CONCRÈTES FACE À LA POLLUTION DE L'AIR INTÉRIEUR

Dr. Dong Hwa Kang
Professeur associé au Département de génie architectural,
Université de Séoul



Unités de ventilation sur la façade d'un bâtiment

Dong Hwa Kang est professeur associé au département de génie architectural de l'Université de Séoul (UOS). Avant de rejoindre l'UOS en 2014, le professeur Kang était chercheur postdoctoral à l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches Canada ainsi qu'à l'Université de Pennsylvanie. Il est titulaire d'une licence, d'une maîtrise et d'un doctorat en génie architectural de l'Université nationale de Séoul.

Ses travaux portent sur la conception de systèmes d'aération et de purification de l'air permettant de réduire les effets nocifs de la pollution de l'air intérieur sur les usagers. Ses publications concernent la modélisation numérique des émissions de polluants intérieurs provenant des matériaux de construction, l'analyse de la circulation et de la dispersion des polluants dans les bâtiments, ou encore le développement de systèmes de filtrage des particules intégrés aux façades double-peau des bâtiments. Le professeur Kang est membre d'associations professionnelles internationales et coréennes parmi lesquelles l'ASHRAE (association américaine des ingénieurs en génie thermique et climatique), l'ISIAQ (association internationale pour la qualité de l'air et du climat intérieurs), la KOSIE (association coréenne pour l'environnement intérieur) et l'AIK (institut d'architecture coréen).

Dans cette interview, Dr Kang présente différents moyens dont dispose un pays pour se saisir de la question de la qualité de l'air intérieur à travers sa législation. À partir du cas de la Corée du Sud, cet article explore les mesures que peuvent prendre les gouvernements pour assurer un contrôle efficace de la qualité de l'air intérieur et pour élaborer un programme d'amélioration pour l'avenir. À partir du débat sur les interactions entre secteurs public et privé, l'auteur montre que la qualité de l'air intérieur est un problème complexe, dont la résolution nécessite l'alignement des politiques publiques, des forces du marché et des citoyens. De manière générale, c'est surtout le dialogue et la transparence entre ces différents acteurs qui permettent d'encourager les bonnes pratiques et de prendre les mesures adéquates. Si la Corée du Sud semble particulièrement en avance sur la gestion de la qualité de l'air à l'échelle nationale, il est souhaitable que d'autres États s'inspirent de ces résultats pour mettre en place une législation innovante sur le sujet.

Quels sont les principaux problèmes en matière de qualité de l'air intérieur en Corée (type de polluants, niveau de particules fines etc.) ?

Dong Hwa Kang : Depuis quelques années, la principale préoccupation en matière de qualité de l'air intérieur en Corée concerne la présence de particules fines telles que les $PM_{2,5}$ et PM_{10} . Les entreprises de construction et les résidents s'inquiètent notamment de la forte concentration de ces particules au printemps et en hiver, non seulement dans l'atmosphère, mais aussi dans les habitations. Selon une étude récente¹ sur la corrélation entre le taux de particules à l'extérieur et la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments résidentiels en Corée, un facteur d'infiltration des particules fines de 0,65 a été mesuré². Ce résultat indique que la présence de particules fines dans l'atmosphère a un impact significatif sur la qualité de l'air intérieur. C'est ainsi que la vente de purificateurs d'air a fait un bond en Corée.

Autre problème essentiel : la présence de radon³ dans les logements. Le ministère de l'Environnement a récemment mené une enquête qui révèle la présence de radon dans les logements et soulevé la nécessité de mesures correctives, dont la création de nouveaux critères de gestion de la qualité de l'air intérieur. En 2018, le seuil maximal de radon pour les logements neufs a été fixé à 200 Bq/m³, et ce niveau a été restreint à 148 Bq/m³ en juillet 2019. Le radon pénètre généralement dans les bâtiments par les fissures des structures souterraines, mais en Corée, le radon que l'on trouve dans les bâtiments proviendrait des matériaux de construction eux-mêmes. Or, il n'existe pas de méthode normalisée pour évaluer les taux d'exhalation du radon des matériaux de construction, bien que des efforts soient entrepris pour la création d'une norme en ce sens.

Selon vous, quelles ont été les mesures les plus efficaces du gouvernement coréen pour lutter contre le problème de la qualité de l'air intérieur ? Quelles ont été les dernières évolutions des politiques publiques ?

D. H. K. : Porté par le fort intérêt des Coréens pour les questions de valeur des biens immobiliers et de santé des habitants, le gouvernement a instauré des critères de gestion stricts en matière de qualité de l'air intérieur. La Corée est donc l'un des rares pays où la qualité de l'air intérieur fait l'objet d'une

législation. Par exemple, le « syndrome du bâtiment malsain » (*sick building syndrom* en anglais), souvent causé dans les nouveaux logements par les composés organiques volatils (COV) et le formaldéhyde, a été pris en compte par la Loi sur le logement⁴ adoptée en 2009 par le ministère de l'Aménagement du territoire, des infrastructures et des transports (MOLIT) et par la Loi sur la qualité de l'air intérieur des installations publiques⁵ adoptée par le ministère de l'Environnement.

En 2014, le gouvernement a mis en place son « Plan quinquennal pour la gestion de la qualité de l'air intérieur » afin de systématiser la gestion de la qualité de l'air intérieur. Ce programme national propose des méthodes de coordination aux ministères qui définissent des mesures détaillées sur les polluants intérieurs et les infrastructures de gestion, et qui surveillent et gèrent ces polluants. En vertu de ce plan, les méthodes de gestion de la qualité de l'air intérieur et les questions connexes sont analysées tous les cinq ans afin de définir les orientations stratégiques futures. Actuellement, le quatrième Plan quinquennal pour la gestion de la qualité de l'air intérieur (2020 à 2025) est en cours d'élaboration. Il vise à mettre en place des mesures de gestion efficaces pour lutter contre la présence de COV et de formaldéhyde dans diverses installations multi-usages (y compris les logements neufs), ainsi qu'à renforcer les dispositifs de lutte contre les particules fines et le radon, notamment en développant des programmes de formation ou d'étiquetage des matériaux.

En outre, pour fournir concrètement des mesures de contrôle plus globales, une « norme de construction pour un habitat sain » (*Construction Standard for Healthy Housing - CSHH*) a été introduite en 2014 par décret, dans le prolongement de la Loi sur le logement. Cette norme porte sur les points suivants :

- 1) Les sources de pollution, à travers notamment l'emploi de matériaux de construction à faibles émissions de polluants ;
- 2) Le débit de la ventilation, en particulier via l'installation de systèmes de ventilation obligatoires ;
- 3) La suppression d'une partie des polluants, par l'usage de matériaux de construction absorbant les COV.

L'application de la norme CSHH fonctionne ainsi : l'entité en charge du projet de construction (généralement une entreprise de construction) qui envisage de construire ou de rénover un immeuble neuf de plus de 500 logements est tenue de préparer un rapport d'autoévaluation, comprenant un programme détaillé en vue de répondre aux différentes exigences du CSHH. La soumission du rapport d'autoévaluation ainsi que du rapport de confirmation de l'autoévaluation sont des processus de contrôle essentiels. Les entreprises de construction doivent déposer les deux rapports auprès d'un bureau public, d'abord à l'étape de la conception, puis en fin de construction. Le rapport confirmant l'autoévaluation doit être réalisé par une société d'inspection spécialisée dans la construction, reconnue par les autorités. Cette

1 Choi, D.H. et Kang, D.H. (2017) « Infiltration of Ambient $PM_{2.5}$ through Building Envelope in Apartment Housing Units in Korea ». *Aerosol and Air Quality Research* 17(2), 598-607.

2 Le facteur d'infiltration est le ratio de concentration entre les particules ambiantes qui pénètrent à l'intérieur et celles qui restent.

3 Le radon est un gaz noble radioactif, incolore et inodore.

4 Loi sur le logement, ministère de l'Aménagement du territoire, des transports et des affaires maritimes, 2009.

5 Loi sur le contrôle de la qualité de l'air des installations publiques, ministère de l'Environnement, 2008.



Vue de la ville de Séoul, Corée du Sud

politique publique encourage ainsi une mise en œuvre efficace de la norme de construction pour un habitat sain.

De plus, dans le cas où l'application de la norme CSHH fait grimper les dépenses pour la construction (par exemple à cause du recours à des matériaux de construction sorptifs⁶), le constructeur est autorisé à reporter ces surcoûts sur le prix de vente des logements (même si ces prix sont réglementés).

Quels processus sont mis en œuvre pour vérifier la bonne application de ces mesures ?

D. H. K. : Après avoir été soumis au bureau public au stade de la conception du projet, le rapport d'autoévaluation établi par le constructeur sert de base à une inspection des logements à la fin de la phase de construction, avant qu'ils soient habités, par une société d'inspection spécialisée. Cette étape permet de confirmer que le détail des plans proposés par le constructeur a été correctement exécuté. Les deux entreprises, de construction et d'inspection, doivent alors rédiger un rapport à l'intention du bureau public en charge, confirmant que la norme sur la construction pour un habitat sain a bien été respectée.

De plus, une vérification du système de ventilation doit être effectuée par

Les constructeurs ont coopéré avec des entreprises spécialisées dans la ventilation pour tenter de résoudre d'une manière innovante le problème des particules fines

des entreprises spécialisée dans les TAB (Testing, Adjusting and Balancing : Essai, Réglage et Équilibrage), agréées par l'association des ingénieurs en génie climatique et réfrigération (SAREK). Tous les logements doivent être testés pour vérifier le fonctionnement des systèmes de ventilation. La procédure de vérification détaillée est spécifiée par la SAREK.

Avez-vous constaté des améliorations notables depuis la mise en œuvre de la norme de construction pour un habitat sain ? Cette norme a-t-elle été révisée depuis sa mise en œuvre en 2014 ?

D. H. K. : En vertu de la norme de construction pour un habitat sain, les constructeurs et les propriétaires doivent utiliser des matériaux de construction conformes aux réglementations en matière d'émission de polluants. Toutefois, des enquêtes ultérieures sur la qualité de l'air intérieur des logements récents ont révélé un taux élevé de non-conformité. La raison exacte n'est pas encore claire, mais une cause possible est la grande étanchéité à l'air que l'on recherche aujourd'hui pour réduire la consommation d'énergie dans un bâtiment. En conséquence, les autorités locales ont établi leurs propres critères pour imposer l'utilisation de matériaux de construction sorptifs. La ville de Seongnam, par exemple, a adopté une réglementation qui exige l'utilisation de matériaux de construction sorptifs pour plus de 60 % de la surface des murs intérieurs.

⁶ Les matériaux de construction sorptifs peuvent améliorer la qualité de l'air intérieur en capturant une partie des particules polluantes.

Par comparaison, la norme sur la construction pour un habitat sain impose seulement que 5 à 10 % des surfaces intérieures soient composées de ces matériaux absorbants.

La Corée a établi un label écologique pour le secteur de la construction. Celui-ci prend-t-il en compte la qualité de l'air intérieur ? Si oui, selon quelles modalités ?

D. H. K. : Le programme Eco Mark et le label coréen HB (*Healthy Building*) ont encouragé l'utilisation de matériaux de construction à faibles émissions en informant les consommateurs sur les émissions de COV et de formaldéhyde des matériaux de construction. Toutefois, ces systèmes d'éco-étiquetage ne sont pas adaptés à la gestion de tous les matériaux distribués sur le marché. En effet, les écolabels sont uniquement délivrés pour les matériaux de construction dont les fabricants ont demandé une certification, ce qui se fait seulement sur une base volontaire. En dépit de l'interdiction d'utiliser des matériaux de construction qui dépassent les critères d'émission spécifiés pour les polluants (formaldéhyde et COV) dans les logements, les restrictions actuelles sur les matériaux de construction ont leurs limites, notamment face à des matériaux de construction complexes et variés. De plus, les diagnostics dépendent d'études effectuées sur des échantillons prélevés sur le marché, et ceux-ci ne sont pas forcément représentatifs. C'est pourquoi, depuis 2016, des restrictions supplémentaires ont été mises en œuvre : avant de fournir les matériaux aux entreprises de construction de logements, les fabricants et les importateurs sont tenus de recevoir des données sur leurs émissions, certifiées par des organismes agréés.

Quelles ont été les initiatives les plus innovantes du secteur privé en matière de qualité de l'air intérieur au cours des dernières années ?

D. H. K. : En Corée, les constructeurs ont développé et mis en œuvre diverses technologies afin de répondre aux exigences des résidents en matière de qualité de l'air intérieur. Les constructeurs ont coopéré avec des entreprises spécialisées dans la ventilation pour tenter de résoudre d'une manière innovante le problème des particules fines, par exemple via l'installation de systèmes FAC (Fresh-air Air Cleaner) avec un filtrage amélioré, des systèmes de douche à air qui peuvent enlever la poussière des vêtements des occupants à l'entrée, etc. Ces méthodes n'avaient encore jamais été testées dans des logements.

Pour respecter les seuils de pollution et les critères prescrits par la loi, ainsi que les exigences des résidents, les entreprises de construction s'engagent activement dans la recherche et le développement de technologies de construction propres. Ce processus se réplique aujourd'hui avec l'apparition de nouveaux problèmes liés à la qualité de l'air intérieur, les particules fines et le radon. Les entreprises du bâtiment s'efforcent également de résoudre les problèmes existants, par exemple en installant des filtres HEPA⁷ sur les VMC (la loi sur le logement stipule qu'un nouveau bâtiment de plus de 100 logements doit impérativement adopter des systèmes de ventilation mécanique ou des dispositifs de ventilation naturelle capables de maintenir un taux de renouvellement de l'air de 0,5).

Selon vous, quels sujets de recherche faut-il approfondir dans le cadre de la qualité de l'air intérieur ?

D. H. K. : Aujourd'hui, comme nous essayons de limiter les dépenses d'énergie, les bâtiments sont de plus en plus étanches à l'air. Or, plus les bâtiments sont étanches, plus les éventuels polluants se concentrent. Il convient de trouver des solutions permettant de maintenir une bonne qualité de l'air intérieur tout en limitant la consommation d'énergie. Les dispositifs de prises d'air à l'extérieur, avancés par les manuels sur la ventilation, sont à prendre en compte. Cependant, en Corée, où l'air extérieur est pollué par les particules fines, il est plus difficile de trouver des solutions. Selon moi, nous devrions étudier de façon plus approfondie les mesures à prendre pour la qualité de l'air intérieur des bâtiments très étanches. Entre autres sujets de recherche, citons la mise au point de

Il convient de trouver des solutions permettant de maintenir une bonne qualité de l'air intérieur tout en limitant la consommation d'énergie. Entre autres sujets de recherche, citons la mise au point de ventilateurs récupérateurs de chaleur à faible consommation d'énergie et de systèmes de purification de l'air

ventilateurs récupérateurs de chaleur à faible consommation d'énergie et de systèmes de purification de l'air. Étant donné l'impact des polluants d'origine extérieure sur l'environnement intérieur, les études sur les liens entre les mesures d'étanchéité des bâtiments et la qualité de l'air intérieur seront importantes. En outre, la constitution de bases de données en continu sur les différents polluants intérieurs sera utile pour aborder cette question à toutes les étapes de la construction des bâtiments, depuis leur conception jusqu'à leur livraison.

⁷ Les filtres HEPA (High Efficiency Particulate Arresting), « collecteurs de particules à haute efficacité », absorbent les particules en suspension dans l'air.

À QUI APPARTIENT L'AIR ? LE MARCHÉ DU CARBONE ET L'ART MULTIMÉDIA CONTEMPORAIN

Andrea Polli,
Artiste et professeure, Université du Nouveau-Mexique (États-Unis)



Andrea Polli - Particle Falls projeté sur l'immeuble Stevens Center à Winston-Salem (Caroline du Nord). ©Jared Rendon-Trompak

Professeure au Collège des beaux-arts et à l'École d'ingénierie de l'Université du Nouveau-Mexique (UNM), Andrea Polli est aussi une éco-artiste qui travaille à la croisée de l'art, de la science et de la technologie. Ses recherches interdisciplinaires ont été présentées au public sous différentes formes : œuvres d'art, installations multimédia, projets collaboratifs, performances, émissions, publications ou encore créations mobiles ou géolocalisées, destinés à sensibiliser le public aux questions environnementales. Ses travaux reposent souvent sur des données scientifiques – fruit de sa collaboration avec des chercheurs et des ingénieurs – qui sont mises en scène par des sonifications, des installations lumineuses ou des créations d'architecture expérimentale. Plusieurs fois sélectionnée pour des bourses et des résidences (au centre d'art Eyebeam notamment), et elle a aussi été distinguée par le Programme Fulbright (2011) et le Prix pour l'art numérique de l'UNESCO (2003).

L'accélération de la crise climatique et la prise de conscience de l'origine principalement humaine de ce dérèglement ont soulevé des questions sur les notions de propriété et de responsabilité. À qui « appartient » la crise du climat et qui est responsable de son atténuation ? Une réponse répandue de la part des gouvernements du monde entier a été de proposer la création d'un marché destiné à vendre l'atmosphère. Mais cette solution commerciale est-elle la seule réponse possible ? Que peuvent nous apporter l'art, la technologie et les médias pour nous aider à imaginer de nouvelles pratiques culturelles et appréhender différemment l'air que nous respirons ?

Les projets *Airlight* et *Particle Falls* d'Andrea Polli sont des projections lumineuses animées qui lèvent le voile sur les dangers invisibles de l'air que nous respirons. Ces œuvres d'art spectaculaires sensibilisent le public en temps réel à la présence et à l'impact de la pollution aux particules fines.

ACHETER L'AIR POUR MIEUX SENSIBILISER À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ?

L'accélération de la crise climatique et la prise de conscience de l'origine principalement humaine de ce dérèglement ont soulevé des questions sur les notions de propriété et de responsabilité. À qui « appartient » la crise du climat et qui peut être tenu responsable de son atténuation ? Une réponse notable de la part des gouvernements du monde entier a été de proposer la création d'un marché sur lequel l'atmosphère serait mise en vente. Cet article analyse le concept de la vente de l'air du point de vue de l'économie, de la politique et de l'art en posant la question suivante : « l'art peut-il aider la science et les politiques climatiques à s'extraire de leur marasme actuel ? ».

Le concept d'économie de l'environnement et des ressources naturelles est né de la prise de conscience du caractère épuisable de ces ressources. Et, puisqu'elles risquent de disparaître, il faudrait créer des incitations pour les préserver. L'économie environnementale propose à la fois un mécanisme de valorisation des ressources naturelles et une incitation à respecter un « budget » fixe. En 1997, le Congrès américain décrivait ainsi ce concept :

« D'un point de vue économique, les problèmes de pollution sont causés par l'absence de droits de propriété clairement définis et appliqués. Les fumées des cheminées, par exemple, se diffusent dans l'air parce que l'air est souvent considéré comme un bien commun utilisable par chacun comme bon lui semble, voire comme un site de décharge. Il n'est donc pas surprenant que ce bien gratuit en apparence soit surexploité. La définition et l'application des droits de propriété sont des prérogatives essentielles du gouvernement pour soutenir l'économie de marché. Il est primordial de définir les droits d'utilisation de l'atmosphère, des lacs et des cours d'eau pour prévenir leur surexploitation. Une fois le cadre légal établi, les marchés peuvent servir à échanger ces droits afin d'améliorer l'efficacité économique. »

On pourrait penser que le concept « d'air à vendre » est une abstraction¹. Pourtant, l'air est commercialisé de multiples façons, par exemple dans les bouteilles d'oxygène utilisées dans la médecine ou le sport, ou dans les systèmes presque omniprésents de climatisation. Sur un mode plus récréatif, citons la popularité grandissante des « bars à oxygène » et de l'air en conserve, où l'air participe à une « thérapie » purifiante et médicale : les clients paient pour une séance d'environ cinq minutes au cours de laquelle ils peuvent se détendre et respirer un air pur, parfois parfumé. Les bars à oxygène se sont popularisés dans les années 1990 au Japon, au Mexique et en Amérique du Sud et ils se sont rapidement multipliés dans les boîtes de nuit, les spas, les casinos et les centres commerciaux en Europe et aux États-Unis. En 2003, le bar à oxygène de Olio!, un restaurant du MGM Grand Hotel de Las Vegas, recevait 200 à 400 clients par jour. De la même manière, les canettes d'air frais rencontrent également un grand succès. Au Japon, une

société a récemment commercialisé à grande échelle O2supli, une canette d'oxygène proposée avec deux parfums : menthe forte (la canette « de l'esprit ») et pamplemousse (la canette « du corps »), au prix unitaire de 600 yens, soit 7,50 dollars. Le concept qui sous-tend le produit est de permettre aux clients de reconstituer leurs niveaux d'oxygène quand ils se sentent assaillis par le stress, la fatigue ou d'autres facteurs.

QUAND L'ART DEVIENT CONCEPT, LE CONCEPT DEVIENT MARCHANDISE²

Peut-être que l'art, et en particulier l'art conceptuel contemporain, a contribué à rendre culturellement acceptable la commercialisation de l'air. En tant qu'œuvres créatives, l'art et l'architecture ont une valeur dans la société. Pas seulement une valeur culturelle, pourtant bien réelle, mais aussi une valeur monétaire.

Les artistes ont adopté différentes stratégies pour traiter la politique de l'air. Dans les années 1950 et 1960, si le concept d'« architecture de l'air » d'Yves Klein a bousculé les principes de

l'art et de l'architecture, il a peut-être aussi contribué à la marchandisation de cette ressource publique qu'est l'air. Klein s'est intéressé à la façon dont les humains utilisent la science et la technologie pour conquérir l'éphémère, au point de transformer l'air et le feu en matériaux de construction. Selon Yves Klein, la science et la technologie ont « sauvé » l'architecture, en rendant possibles de nouvelles formes et structures obtenues en sculptant l'air et d'autres « matériaux

immatériels ». Il pensait que l'architecture de l'air pourrait réellement améliorer l'environnement : « Les architectures de l'air doivent s'adapter aux données et conditions naturelles, aux montagnes, vallées, moussons, etc., si possible sans nécessiter l'opération de grandes modifications artificielles »³.

Autre exemple, le *Bonaqua Condensation Cube* de Tue Greenfort (2005) qui rend hommage au *Condensation Cube* de Hans Haacke (1963). Cette œuvre contemporaine condense de l'eau en bouteille de la marque Bonaqua. Ce faisant, Greenfort aborde directement la question de la propriété. Ce qui était considéré comme une ressource publique en 1963 est devenu un produit commercial en 2005. Comme l'œuvre qui l'a précédé, ce cube a été exposé dans une galerie d'art en espérant qu'on lui attribue au moins une valeur monétaire, voire qu'on l'achète. Cela soulève un paradoxe : l'œuvre contemporaine dénonce l'absurdité du système des galeries d'art, mais elle en a besoin pour exister.

En 2005, le projet *Hays Woods/Oxygen Bar* de Laurie Palmer, soutenu par la Carnegie Mellon University, met en lumière les processus naturels qui créent l'atmosphère et attire l'attention sur le fait que l'air est une ressource publique : le bar à oxygène est une machine mobile qui permet de respirer gratuitement l'oxygène produit par la photosynthèse de plantes provenant de la forêt de Hays Woods.

*Peut-être que l'art,
et en particulier l'art
conceptuel contemporain,
a contribué à rendre
culturellement acceptable
la commercialisation de l'air*

1 Voir George England, *The Air Trust* (1915), traité dans Fleming, *Fixing the Sky*, 36–38.

2 Alberro et Buchmann, éd., *Art after Conceptual Art*.

3 Klein, Noever et Perrin, *Air Architecture*.

Ce bar mobile, promené dans les rues de Pittsburgh, cherchait à reproduire en miniature les effets bénéfiques des espaces verts de la ville qui purifient et rafraîchissent l'air que nous respirons. L'œuvre anticipait la disparition imminente d'une partie de la forêt de Hays Woods, une ressource publique qui filtre l'air pollué de Pittsburgh et régénère son oxygène. L'intérêt des habitants du comté d'Allegheny pour le bar à oxygène ne faisait qu'annoncer l'implication active qu'ils auraient par la suite, en se mobilisant pour préserver ces terres agissant directement sur la santé publique.

Les questionnements soulevés par les travaux abordés ici ne sont en rien une critique des œuvres et, d'ailleurs, les artistes mériteraient d'être félicités dans tous les cas pour mettre en lumière des questions aussi complexes. Les paradoxes qui en découlent dépendent des systèmes dans lesquels les œuvres sont exposées. Il s'agit soit du monde des galeries d'art, c'est-à-dire une économie basée sur l'achat et la vente des œuvres, soit du système public où les œuvres d'art sont la propriété de gouvernements ou d'intérêts privés, y compris les œuvres présentées dans un cadre semi-public comme les marchés ou Internet. Dans le contexte du changement climatique, les œuvres soulèvent des questions plus vastes sur le potentiel de l'art en ces temps de crise environnementale mondiale, notamment sur la capacité de l'art à collaborer avec la science.

AIRLIGHT

Airlight, littéralement « lumière de l'air », est le nom donné à un brouillard blanc créé par l'éclairage de fines particules de poussière flottant dans l'atmosphère. Le terme est souvent employé à Los Angeles où les gaz d'échappement provoquent ce phénomène, que l'écrivain Lawrence Weschler compare à « un milliard de minuscules soleils ». La série de projets portant ce nom a débuté par *Airlight Taipei* à l'été 2006. À cette saison, le climat de Taipei est terriblement chaud et humide, contraignant les habitants à passer le plus clair de leur temps dans des lieux climatisés. Avec plus de six millions de personnes vivant dans le grand Taipei, la métropole est surpeuplée. Bien que les transports publics y soient excellents, plusieurs autoroutes surélevées sillonnent la ville, telles des traînées lumineuses traversant un air dense. En outre, la situation géographique de la ville favorise la pollution atmosphérique : Taipei se trouve au fond d'une cuvette partiellement encerclée de petites montagnes. L'air, qui ne peut donc s'échapper que par une brèche étroite, a tendance à stagner pendant plusieurs jours. D'autant plus que Taipei est sous le vent des villes du sud de la Chine, où de nouvelles centrales à charbon ont été construites pour répondre à la hausse de la demande en énergie qui a accompagné le virage économique du pays. Les vents d'ouest transportent dans l'atmosphère de Taipei une grande partie de la pollution de l'industrie houillère chinoise.

Quand j'étais accueillie en résidence au Taipei Artist Village, j'ai eu la grande chance de rencontrer et de travailler avec le Dr Chung-Ming Liu, directeur du Global Change Research Center

et professeur au département des sciences de l'atmosphère de la National Taiwan University. Dans le cadre de notre projet, le Dr Liu a collecté, formaté et mis en ligne des données en temps réel sur la qualité de l'air dans près de vingt quartiers de Taipei. J'ai ainsi pu télécharger automatiquement les volumes

horaires de particules fines, d'ozone et d'autres substances polluantes dans l'atmosphère de Taipei. J'ai ensuite transposé ces informations simultanément dans un paysage à la fois sonore, visuel et changeant, traduisant le « bruit » des polluants en une sorte de rythme qui reflétait ce que le Dr Liu appelle la « variation quotidienne » de la qualité de l'air dans la ville.

Le bureau de gestion du trafic routier de Taipei dispose de nombreuses caméras, ce qui m'a permis de synchroniser le

son de la qualité de l'air avec des images en temps réel de la circulation. J'ai utilisé les niveaux de polluants pour disloquer les images qui apparaissaient et disparaissaient au rythme de l'augmentation et de la diminution des niveaux de pollution. Cette structure répétitive a permis de créer un rythme, comme un bruit de fond.

La représentation visuelle était elle aussi structurée autour du concept de bruit. L'image originale était celle, non modifiée, d'une caméra de contrôle de la circulation, qui se pixélisait en fonction du niveau de substances polluantes dans l'air. Ainsi, images nettes et images floues alternaient au rythme des variations du son. Cette alternance donnait vie à l'image, qui semblait frémir et respirer. À propos de l'art éphémère basé sur des processus, Steven Connor déclare que « dans beaucoup d'œuvres d'art contemporain, l'air est devenu le marqueur, non pas de la différence entre l'art et la vie, mais de l'aspiration de l'art à aller au-delà de son périmètre prédéfini, pour s'approcher

Dans beaucoup d'œuvres d'art contemporain, l'air est devenu le marqueur, non pas de la différence entre l'art et la vie, mais de l'aspiration de l'art à aller au-delà de son périmètre prédéfini pour s'approcher et se fondre dans la condition de la « vie »



Particle Falls © Jared Rendon-Trompak



Particle Falls © Jared Rendon-Trompak

et se fondre dans la condition de la “vie” ». Avec la série *Airlight*, j’ai essayé de donner « vie » aux données sur la qualité de l’air qui étaient collectées, en composant ce cri et ce flou d’images, plus alarmants et plus intenses à mesure que le niveau de pollution augmente.

PARTICLE FALLS

La création de *Particule Falls* répond à trois objectifs fondamentaux : utiliser l’art et la technologie pour rendre l’invisible visible et tangible aux yeux du public, imaginer et présenter de nouvelles formes d’espace public conçues pour donner envie d’agir, et démontrer que des personnes et des communautés bien informées peuvent contribuer au changement.

Particle Falls est une projection nocturne qui permet aux spectateurs de visualiser les niveaux réels de particules fines dans l’atmosphère, visibles pour la première fois sous forme d’une cascade lumineuse le long de la façade de l’immeuble AT&T à San Jose (Californie) grâce aux dernières technologies de projection. Un néphélomètre est utilisé pour mesurer la concentration des plus petites particules, d’un diamètre inférieur à 2,5 microns, dont la surveillance est l’une des plus récentes avancées de l’aéronomie. Moins il y a de particules fines dans l’air, moins on voit de minuscules points brillants dans la cascade. *Particle Falls* est en somme une installation d’art public à grande échelle qui constitue tout à la fois un indicateur, un signal d’alarme et un élément esthétique. Ce travail a été rendu possible par le projet *AirNow* de Tim Dye, qui agrège l’ensemble des données sur la qualité de l’air aux États-Unis et les partage en direct dans l’ensemble du pays, afin de sensibiliser le public à la pollution atmosphérique et d’encourager les changements de comportement. Attirer l’attention sur la pollution environnementale à San Jose était l’un des grands objectifs de *Particle Falls*, l’American Lung Association ayant attribué une note négative au comté de Santa Clara pour la qualité de l’air en 2009. Selon le rapport sur

l’état de l’air de cette association pour la santé pulmonaire, les seuils nocifs à court terme de concentration de particules sont dépassés pendant une moyenne de 11 jours par an, ce qui place la ville au 24^e rang des plus mauvais élèves en la matière aux États-Unis. Le nombre de décès annuels liés à la pollution de l’air par les particules fines a triplé en Californie.

Dans la droite ligne des objectifs de développement durable de la ville, ce travail montre l’impact de l’homme sur l’environnement. L’œuvre, placée sur un axe de circulation routière, était suffisamment sensible pour détecter la pollution générée par un camion ou même par un piéton fumant une cigarette. Si elle avait été installée pendant une période plus longue, elle aurait pu démontrer à quel point un projet de transport public – par exemple un métro léger sur rail – pourrait améliorer la qualité de vie des habitants de San Jose. Depuis cette première installation, *Particule Falls* a été présentée dans dix villes du monde entier, notamment à Paris à l’occasion de la Conférence sur le climat COP21.

CONCLUSION

En se concentrant sur les particules présentes dans l’air, plutôt que sur le dioxyde de carbone qui est invisible, l’artiste élargit son approche de la pollution environnementale en général.

Ces projets comportent en outre de multiples facettes. D’un point de vue social, ils ont favorisé l’interaction avec le public via Internet et les téléphones mobiles, les citoyens ayant collaboré avec des scientifiques, des designers et des ingénieurs. D’un point de vue technologique et économique, ils ont réussi à associer l’art public aux technologies émergentes et aux médias numériques. Pour cela, ils ont utilisé des données de surveillance environnementale actualisées pour créer des animations en temps réel et mettre en valeur de nouvelles technologies en adoptant, quand cela était possible, des énergies alternatives et des systèmes moins consommateurs d’énergie.

POLLUTION PODS : QUAND L'ART CHANGE NOTRE PERCEPTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE LA POLLUTION DE L'AIR

Michael Pinsky,
Artiste

Laura Sommer,
Chercheuse à l'Université norvégienne
des sciences et de la technologie (NTNU)



Pollution Pods à Trondheim, Norvège pendant le Festival Starmus, 2017
©Michael A Pinsky

Michael Pinsky est un artiste britannique dont les projets d'envergure internationale prennent souvent la forme de résidences qui explorent les enjeux de la sphère publique. Il endosse à la fois les rôles d'artiste, d'urbaniste, de militant, de chercheur et de citoyen. Il collabore étroitement avec le territoire, ses ressources et ses habitants et laisse ainsi l'environnement physique, social et politique définir sa méthodologie. Son travail a notamment été exposé à Londres à la Tate Britain, la galerie Saatchi et au Victoria and Albert Museum ; au musée d'art contemporain de Chengdu ; au parc de la Villette, à Paris ; au musée d'art moderne d'Oxford ; au Armory Center of the Arts à Los Angeles... Michael Pinsky est diplômé du Royal College of Art de Londres. Il a été récompensé entre autres par la Royal Scottish Academy, l'Arts Council England et le Wellcome Trust, et son exposition Pontis a été sélectionnée pour le prestigieux Gulbenkian Museums Award.

Laura Sommer est l'une des deux doctorantes travaillant sur le projet Climart. Diplômée en psychologie, elle a approfondi ses connaissances sur le climat et la nature dans le cadre d'un master sur l'écologie du changement climatique. Laura Sommer a travaillé au département de psychologie de l'Université norvégienne des sciences et de la technologie et s'est particulièrement intéressée à la communication environnementale créative, au changement des comportements et à la psychologie cognitive.

L'œuvre *Pollution Pods* (en français : capsules de pollution) fait partie du programme de recherche Climart, qui explore les manières dont l'art peut changer les perceptions du changement climatique. Avant de présenter le projet des *Pollution Pods* en lui-même, Michael Pinsky décrit le processus de création artistique qu'il a suivi et explique en quoi son œuvre vise à répondre au défi de « représenter l'invisible ». La conception des *Pollution Pods* s'inscrit dans le cadre d'une étude scientifique sur les réactions que l'art engagé peut susciter auprès du public. L'idée consiste à observer dans quelle mesure une installation artistique amène non seulement à réfléchir sur la vie quotidienne, mais aussi à modifier les comportements.

Avec *Pollution Pods*, l'artiste espère bousculer notre manière de voir la pollution, qui reste généralement un phénomène auquel nous nous sommes progressivement habitués, en arrière-plan de notre quotidien. Pour cela, cinq dômes géodésiques, cinq espaces physiques clos contenant de l'air pollué de cinq villes du monde, sont mis bout à bout pour forcer le public à faire l'expérience d'une modification brutale de la qualité de l'air. Les *Pollution Pods* offrent une expérience éminemment sensorielle dont l'objectif n'est pas tant de proposer aux visiteurs le divertissement d'un danger maîtrisé, mais plutôt de les inviter à réfléchir sur leurs propres contradictions et à modifier leurs comportements. En effet, lorsque la pollution devient aussi palpable, peut-on encore fermer les yeux ?

IMPLIQUER LES CITOYENS DANS LA CRISE CLIMATIQUE : QUE NOUS DIT LA PSYCHOLOGIE ENVIRONNEMENTALE ?

« Les pratiques esthétiques engagées sur le plan politique ne se contentent pas de sensibiliser ou de porter un message. Il ne s'agit pas de propagande. Au contraire, les pratiques esthétiques opèrent par le truchement d'une «étrangeté radicale» qui réaligne, bouleverse et réinvente l'engagement politique sous forme d'événements matériels et concrets (Rancière, 2004 [2000]). Un tel bouleversement peut devenir une manière de matérialiser et verbaliser ce qui est autrement indicible et impensable. » (Gabryss & Yusoff, 2012)

Depuis le début de ma carrière, ma pratique artistique est liée à l'urgence des questions environnementales. Pour la COP21, organisée à Paris en 2014, j'ai vidé le canal Saint-Martin des nombreux objets jetés par les parisiens pendant l'année. Bien sûr, notre équipe a trouvé un grand nombre de caddies et de vélos, omniprésents dans la ville, mais nous avons aussi eu la surprise de trouver des cadres de lits simples et de petits réfrigérateurs, comme autant de traces possibles d'une population de passage ou en migration. Pour accompagner la remontée de ces objets à la surface du canal, j'ai réalisé des enregistrements sonores, afin de créer une composition. Mon intention était de pointer du doigt notre insatiable appétit pour la consommation et de souligner la nécessité d'un système efficace pour gérer nos déchets. Cette installation appelée *L'Eau Qui Dort* a attiré l'attention d'un groupe de scientifiques spécialistes de l'environnement, qui travaillait à l'Université norvégienne des sciences et de la technologie sur un projet nommé Climart. Ils ont souhaité intégrer *L'Eau Qui Dort* à une étude de trente-sept œuvres exposées dans le cadre de la COP21 pour voir si l'art pouvait modifier notre perception du changement climatique.

Dans la première publication issue de cette collecte de données (Sommer & Klöckner, 2019¹), les chercheurs ont divisé les œuvres en quatre catégories en fonction des réactions émotionnelles du public. Ensuite, ils ont regardé les pensées ou « cognitions », selon la terminologie utilisée en psychologie, exprimées par les spectateurs à la vue des œuvres d'art. Les recherches en psychologie environnementale ont déterminé les cognitions à étudier en fonction de leur capacité à interpeller sur la crise climatique : par exemple, l'œuvre invite-elle les spectateurs à la réflexion et à la contemplation ? Le sujet de l'œuvre a-t-il un rapport avec leur quotidien ? L'œuvre souligne-t-elle l'impact de leur comportement personnel sur l'environnement ? Voilà le type de questions posées aux visiteurs.

Pour finir, les chercheurs ont essayé de cerner des caractéristiques communes aux œuvres de chaque catégorie, et d'établir un lien avec les réactions émotionnelles et cognitives suscitées. La première catégorie, qui regroupait les œuvres participatives, ludiques et colorées, semblait procurer un sentiment de bien-être aux spectateurs, mais les réactions cognitives ont montré qu'elles incitaient moins à la réflexion et à la contemplation, et qu'elles semblaient moins pertinentes au regard du quotidien. Les chercheurs ont donc décidé d'intituler cette catégorie « L'utopie réconfortante ».

L'Eau Qui Dort faisait partie de la deuxième catégorie, « La dystopie perturbatrice ». Face à cette œuvre dystopique, les spectateurs avaient un sentiment de confrontation : quelque chose d'inhabituel les incitait à s'arrêter. L'œuvre faisait écho à leur quotidien et leur faisait prendre conscience de l'impact de leur propre comportement.

¹ Sommer, L. K. et Klöckner, C. A. (2019). *Does activist art have the capacity to raise awareness in audiences? A study on climate change art at the ArtCOP21 event in Paris.* Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts.



Pollution Pods à Portland, Royaume-Uni © Michael A Pinsky



À la découverte des *Pollution Pods* lors de la conférence TED 2019 à Vancouver - ©MA - Marla Aufmuth

D'après les chercheurs, les œuvres qui semblaient susciter les réactions (positives ou négatives) les plus intenses sur les plans émotionnel et cognitif étaient celles qui montraient les liens de cause à effet entre nos actions et certaines situations ou des solutions à certains problèmes. Cet ensemble a été nommé « La solution géniale ».

Dans une seconde publication (qui est encore en cours de validation), les chercheurs ont établi les faits suivants :

- l'influence des émotions négatives sur les réflexions relatives à l'œuvre d'art est plus forte que l'influence des émotions positives, mais les deux types d'émotions encouragent le public à soutenir des efforts politiques ;
- les pensées et réflexions induites par ces émotions ont poussé les spectateurs à soutenir les politiques de lutte contre le changement climatique.

Laura Sommer et Christian Klöckner en ont conclu que, dans l'art engagé, c'était la subjectivité de la réaction déclenchée qui donnait sa puissance à l'expérience artistique, et que certaines caractéristiques des œuvres d'art étaient plus à même de provoquer une réaction subjective, émotionnelle et réflexive chez les spectateurs.

Les gens ne modifient leurs habitudes que si leur quotidien se trouve perturbé

CONCEPTION DU PROJET DES POLLUTION PODS

Après la COP21, les scientifiques de Climart ont voulu étudier une œuvre d'art de façon plus approfondie et se servir de leur étude menée à la COP pour influencer la création d'une nouvelle œuvre. J'ai été sélectionné par le groupe de chercheurs pour une nouvelle commande à Trondheim. Si mes projets ont toujours pour but de sensibiliser le public aux questions environnementales et de tenter de faire évoluer comportements, perceptions et mentalités, je n'avais jusqu'alors jamais vraiment pu savoir de manière empirique si mes créations atteignaient leur objectif. Ce projet m'offrait enfin l'occasion de comprendre les effets de ma démarche sur les participants.

Pendant la première phase du projet, l'équipe a partagé avec moi ses conclusions et la manière dont elle voyait l'étude. Nous avons parlé des causes et des conséquences du changement climatique et évoqué ces solutions qui ne conviennent à personne. Nous avons parlé du sentiment d'impuissance qui saisit les gens à la vue des images emblématiques du changement climatique : l'ours polaire sur son iceberg en train de fondre ou l'enfant affamé sur un sol désertique craquelé par le soleil. Nous avons parlé du cadre privilégié qu'offre l'art dans la mesure où le spectateur prend le temps de réfléchir et y est invité. Nous avons parlé de la capacité de l'art à rapprocher les gens physiquement et psychologiquement pour faire naître un sentiment de solidarité et promouvoir l'action collective.



Les Pollution Pods de Michael Pinsky à Somerset House pour la Journée de la Terre 2018 - © Peter Macdiarmid pour Somerset House



Un visiteur exposé à l'air pollué des Pollution Pods à Trondheim, Norvège © Thor Nielsen / NTNU

Nous avons parlé de la manière dont l'art pouvait bousculer les normes sociales et en créer de nouvelles.

À la lumière de ces conversations et des conclusions des études issues de l'ArtCOP21, une chose est apparue clairement : les gens ne modifient leurs habitudes que si leur quotidien se trouve perturbé. Bien sûr, le changement climatique a des effets directs sur certaines parties du monde où le niveau de la mer et la température augmentent ou qui sont exposées aux phénomènes météorologiques extrêmes. Mais dans la plupart des villes occidentales, les effets du changement climatique paraissent encore bien lointains. J'ai donc commencé à réfléchir à ma propre vie à Londres et à certaines causes du changement climatique. Les conséquences de l'utilisation de combustibles fossiles sont effectivement perceptibles, avec la pollution de l'air en ville. Même si cette pollution ne contribue pas de manière significative au changement climatique, les causes de la pollution de l'air et de ce dernier coïncident pour une large mesure.

L'une des raisons qui dissuadent les individus de changer de comportement, que ce soit pour agir sur le changement climatique ou sur la pollution, c'est que nous nous habituons à un environnement qui évolue progressivement. À l'échelle mondiale, les changements sont relativement imperceptibles, et la violence qui les accompagne semble au ralenti.

*À l'échelle mondiale,
les changements sont
relativement imperceptibles, et
la violence qui les accompagne
semble au ralenti*

pour la pollution : nous sommes capables d'adapter nos sens pour nous accommoder du bruit ambiant, des agressions visuelles et de l'air toxique, pour les bloquer mentalement. Ce n'est que lorsque nous passons rapidement d'un environnement à un autre que nous remarquons vraiment la différence et que nous y prêtons attention. C'est souvent ce qui se produit quand nous sortons d'un train ou d'un avion : la sensation est brutale car nos sens n'ont pas encore eu le temps de s'acclimater à un nouvel environnement.

Partant de ce constat, j'ai commencé à travailler sur l'idée d'une série de pièces reliées, dont chacune contiendrait de l'air pollué provenant de l'une des plus grandes villes du monde. Transportés de ville en ville en passant d'une pièce à l'autre, les visiteurs n'auraient pas le temps de s'acclimater et percevraient comme un choc le passage à chaque environnement distinctivement pollué.

Au départ, je pensais que l'installation serait assez simple ; il me suffirait de me rendre dans les villes que j'avais sélectionnées pour prélever un échantillon d'air à l'aide d'un compresseur et le rapporter en Norvège pour libérer cet air pollué dans les différentes pièces. J'ai décidé de demander conseil à des scientifiques. J'ai d'abord fait escale à l'Institut norvégien de recherche sur l'air. Les experts ont eu un avis à la fois intéressant et très clair sur mon approche : le processus de compression de l'air pouvait engendrer la formation d'une solution volatile, et il était dangereux de libérer

cet air dans un espace confiné. De plus, l'impression que l'on a de la pollution est fortement altérée par l'humidité et la température. Avec ces éléments en tête, j'ai commencé à réfléchir à la meilleure façon d'aborder le concept de la pollution. Le premier défi consistait à rendre concret quelque chose d'essentiellement invisible.

Dans le cadre de mes projets, je prends en compte à la fois la narration de l'œuvre, que je vois comme son axe horizontal, et l'instant visuel, qui devient l'axe vertical. Souvent, les pratiques sociales et les œuvres engagées dans une cause proposent des histoires fortes, mais qui manquent de clarté visuelle. Une œuvre d'art qui a un impact visuel fort, attirant, surprenant ou choquant peut marquer durablement les esprits, plus que n'importe quel texte. La manifestation visuelle de l'œuvre peut constituer un raccourci vers le thème qu'elle incarne. Mais les œuvres d'art qui illustrent un problème de façon trop littérale ne transmettent pas les nuances, celles qui suscitent des réactions du type « OK, j'ai compris ». Au contraire, l'essence visuelle de l'œuvre doit instaurer un dialogue avec la question qu'elle tente de résoudre et faciliter la réflexion du public, sans être didactique.

Pour matérialiser ces environnements pollués pour le projet Climart, j'ai pensé au dôme géodésique. Cette structure est utilisée à la fois dans les scénarios de crise et dans les expériences sur la biosphère. Conçu par Richard Buckminster Fuller², le dôme géodésique renvoie également à son manifeste fondateur, *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial «Terre»*, un ouvrage qui reste étonnamment d'actualité plusieurs décennies après sa publication. J'ai proposé de former un cercle avec ces dômes et de les relier par un tunnel, ce qui suggère l'interconnectivité de nos biosystèmes et nous rappelle que l'air ne s'arrête pas aux frontières nationales. En utilisant la structure emblématique de Fuller comme énoncé visuel et métaphore spatiale, l'œuvre *Pollution Pods* allie l'art et la technologie, et questionne le rôle que joue la division et le confinement comme techniques de la modernité.

Une œuvre d'art qui a un impact visuel fort, attirant, surprenant ou choquant peut marquer durablement les esprits, plus que n'importe quel texte

ÉVALUATION SCIENTIFIQUE

D'un point de vue scientifique, les chercheurs ont dû réfléchir aux aspects des *Pollution Pods* qui auraient, selon eux, le plus d'effet sur les visiteurs : serait-ce l'expérience des dômes pris isolément ? Quand faudrait-il interroger les visiteurs sur leurs impressions et leurs réflexions : après chaque dôme ou à la fin de l'expérience ? Quelles impressions et réflexions devraient, logiquement, déclencher cette œuvre d'art ? Quel serait le meilleur moyen d'évaluer les réactions face à cette œuvre ?

Les chercheurs ont décidé de mener deux types d'interviews : qualitatives, en choisissant des visiteurs de façon aléatoire ; et quantitatives, pour mesurer les impressions et les réflexions une fois l'œuvre expérimentée dans son ensemble. L'étude qualitative a révélé que les *Pollution Pods* offraient aux visiteurs une forme d'apprentissage par l'expérience, qui réduit la distance psychologique avec le changement climatique. Grâce à cette installation, ils réalisent comment la pollution de l'air et le changement climatique les affectent et les affecteront dans leur vie quotidienne.

D'un autre côté, l'étude des questionnaires par Laura Sommer, Janet Swim, Anna Keller et Christian Klöckner révèle que la volonté d'agir des visiteurs, déjà forte, s'était renforcée dans une certaine mesure après leur visite. Ce regain de volonté

était associé à des émotions telles que la tristesse, l'impuissance et la colère, à des pensées liées à la « prise de conscience des conséquences environnementales de nos actions, à la volonté d'assumer la responsabilité de ces conséquences et la croyance en la pertinence des problèmes environnementaux dans notre quotidien » (Sommer, Swim, Keller et Klöckner, en cours d'impression³). Toutefois, malgré ces bonnes intentions, peu de visiteurs en ont profité pour estimer leurs émissions de CO₂.

Il n'a donc pas été possible de mesurer les changements de comportement réels après la visite, un problème bien connu de la recherche en psychologie environnementale. Néanmoins, Laura Sommer et ses collègues ont souligné que l'œuvre d'art jouait un rôle particulièrement efficace pour susciter une réflexion personnelle sur le changement climatique et la responsabilité de chacun à agir. À cet égard, les *Pollution Pods* ont su mettre en évidence ces réflexions.

Remarque : les résultats scientifiques n'ont été publiés qu'en partie. Des résultats détaillés ne peuvent être présentés que pour certaines des études décrites dans cet article.

² Richard Buckminster Fuller (12 juillet 1895-1^{er} juillet 1983) était architecte, théoricien, auteur, designer, inventeur et futuriste. Il a développé de nombreuses inventions, notamment architecturales, et a popularisé ses fameuses coupes géodésiques. En 1968, un an avant le premier homme sur la lune, son ouvrage *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial « Terre »* reconceptualisait la Terre comme un vaisseau, soulignant la responsabilité de l'Humanité face au maintien d'une atmosphère viable.

³ Sommer, L. K. et Klöckner, C. A. (2019). *Does activist art have the capacity to raise awareness in audiences? A study on climate change art at the ArtCOP21 event in Paris.* Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts.

DESCRIPTION DES POLLUTION PODS

Pollution Pods est une installation artistique dans laquelle cinq dômes géodésiques disposés en cercle sont reliés entre eux par des portails en forme de polygones.

Chaque dôme permet de respirer l'air d'une ville du monde (Londres, Pékin, New Delhi, Sao Paulo et Tautra, qui se trouve sur une île en Norvège). Une recette soigneusement pensée recrée les proportions d'ozone, de particules, de dioxyde d'azote, de dioxyde de soufre et de monoxyde de carbone qui polluent ces villes. Le visiteur traverse ces espaces de plus en plus pollués, du plus sec et froid vers le plus chaud et humide.

L'expérience consistant à traverser les *Pollution Pods* révèle à quel point nos espaces sont interconnectés et interdépendants. Cette installation permet d'avoir un avant-goût de ces environnements, qui sont une réalité pour une grande partie de la population mondiale.

Cette « pollution » est reproduite en laboratoire. C'est une représentation olfactive des toxines, réalisée par une entreprise qui produit généralement des arômes et des parfums artificiels destinés à rendre les produits de base plus attrayants au goût ou à l'odorat. Ici, l'art semble imiter la vie, offrant à un public privilégié le frisson du danger mais en toute sécurité. Cependant, cette fausse pollution ne se contente pas de « faire référence au réel auquel elle est subordonnée », elle est également impliquée dans

les phénomènes qu'elle représente : les équipements de contrôle environnemental utilisés, à chaque étape de leur cycle de vie, depuis l'extraction des ressources jusqu'à leur fabrication, leur utilisation et leur élimination, génèrent eux aussi de la pollution. De même, en prenant en compte la fabrication de l'installation en bioplastiques, sa consommation d'électricité et son transport par terre, mer et air, nous mettons le doigt sur des impacts écologiques qui vont de l'échelle microscopique (les émissions de particules) à l'échelle macroscopique (les effets sur le climat). Bien que présenté comme hypothétique et lointain, le danger est réel et présent.

Pollution Pods est un symbole de notre foi utopique en la technologie, fantasme séculaire de contrôle, qui engendre une anxiété obsédante quant au possible retour de ce qui a été réprimé et exclu. Être immergé dans l'œuvre, c'est expérimenter le caractère illusoire de la séparation de l'expérience artistique par rapport au quotidien, et reconnaître le monde de l'art comme un sous-ensemble du monde.

En plaçant l'acte vital de la respiration au cœur de l'expérience artistique, *Pollution Pods* nous montre à quel point le décalage entre connaissance incarnée et ignorance volontaire est insupportable. Et si le souvenir puissant de ces lieux pollués nous faisait réfléchir, avant d'acheter le prochain objet dont nous n'avons pas besoin ?

CRÉDITS

Pollution Pods, une commande de l'Université norvégienne des sciences et de la technologie pour le projet *Climart*, a été construit avec le soutien de BuildwithHubs. *Pollution Pods* a reçu le financement de Arts Council England. La visite de *Pollution Pods* est gérée par Cape Farewell. Les « cocktails » de pollution ont été créés par le réseau mondial d'experts de la parfumerie d'IFF et diffusés via la technologie Aroma.

EXPOSITIONS

Pollution Pods a été présenté au public à STARMUS, Trondheim (Norvège) ; à Somerset House, Londres (Royaume-Uni) ; à la Première Conférence mondiale de l'OMS sur la pollution de l'air et la santé, Place des Nations, Genève (Suisse) ; à la Klimahaus, Bremerhaven (Allemagne) ; à la conférence TED annuelle, Vancouver (Canada) ; à la Clean Air Week, Media City UK, Manchester (Royaume-Uni) ; à B-Side, Portland (Royaume-Uni) ; à la Melbourne Science Gallery (Australie) ; au Sommet de l'ONU sur l'action pour le climat, Siège des Nations-Unies, New York (États-Unis) ; à Nuit Blanche, Brownsea Island, Activate (Royaume-Uni).

RÉFÉRENCES

Gabrys, J. et Yusoff, K. (2012). *Arts, sciences and climate change: practices and politics at the threshold*. *Science as Culture*, 21(1), 1-24. DOI: 10.1080/09505431.2010.550139

Sommer, L.K. et Klöckner, C.A. (2019). *Does Activist Art Have the Capacity to Raise Awareness in Audiences?— A Study on Climate Change Art at the ArtCOP21 Event in Paris*. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. <http://dx.doi.org/10.1037/aca0000247>

Sommer, L.K., Swim, J.K., Keller, A. et Klöckner, C.A. (en cours d'impression). « Pollution Pods »: The merging of art and psychology to engage the public in climate change. *Global Environmental Change*.

Rédacteur en chef : Nicolas Renard, Directeur de la Prospective, Institut Veolia

Rédactrice en chef adjointe : Fanny Arnaud, Directrice des programmes, Institut Veolia

Directrice de la publication : Dinah Louda, Directrice exécutive, Institut Veolia

Organisme émetteur :

Field Actions Science Reports (FACTS) est publié par l'Institut Veolia. EISSN: 1867-8521

Contact :

institut.ve@veolia.com

©AUTEUR(S) :

Les auteurs conservent la titularité des droits d'auteur mais autorisent le public à copier, distribuer, transmettre et adapter leurs travaux à condition que leur nom soit cité comme il se doit.

Conception : Studio graphique Veolia / **in crea** *

Réalisation : **in crea** *

Imprimé en France

avec des encres à base végétale par un prestataire labellisé Imprim'vert sur du papier traité sans chlore, certifié FSC, produit issu de forêts bien gérées et d'autres sources maîtrisées.

Crédits photos :

Couverture : Pollution Pods de Michael Pinsky à la Somerset House à l'occasion du Jour de la Terre 2018 ©Peter Macdiarmid pour la Somerset House
Photothèque Veolia, Shutterstock, Adobe Stock et différents crédits mentionnés dans les légendes des visuels.

***"Notre futur sera ce que nous en ferons.
L'air est l'un des biens publics mondiaux
les plus fondamentaux."***

Philippe Kourilsky

Directeur général honoraire de l'Institut Pasteur
Membre du Comité de prospective de l'Institut Veolia

Institut Veolia

30, rue Madeleine Vionnet • 93300 Aubervilliers, France

www.institut.veolia.org