

Pollution de l'air intérieur en milieu urbain : diagnostiquer et traiter

Frédéric Thévenet est Professeur à l'Institut Mines Télécom¹, IMT Lille Douai. Il est spécialiste de l'interaction gaz-surface notamment appliquée au traitement de l'air.

Il y a trois raisons de s'intéresser à la qualité de l'air dans les espaces intérieurs.

La première raison est qu'on passe finalement peu de temps dans des endroits non abrités, puisqu'on passe 90 % de notre temps dans des espaces confinés. On est donc relativement peu exposé à l'air extérieur par rapport à l'air intérieur : on a commencé avec les cavernes et on a étendu cela à l'habitat, au véhicule, au lieu de travail, à la salle de sport, à l'espace, au transport public (**Figure 1**).

La deuxième raison est le coût d'une mauvaise qualité de l'air intérieur : 40 milliards d'euros dont un milliard directement dédié à des médicaments antiasthmatiques. Cela trahit donc un impact sanitaire marqué.

La troisième raison, c'est le nombre de décès (voir aussi le **Chapitre de R. Lacombe** dans cet ouvrage *La chimie et les grandes villes*, EDP Sciences, 2017) : 4 millions par an, causés par une mauvaise qualité de l'air intérieur, un chiffre qui est annoncé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).



Figure 1

On passe 90 % de notre temps dans des espaces confinés, d'où l'importance de la qualité de l'air intérieur.

1. <https://www.imt.fr>

1 L'impact sanitaire d'un air intérieur pollué

1.1. Des pathologies variées

La mauvaise qualité de l'air intérieur peut donner lieu à des pathologies variées (*Encart : « Les impacts sanitaires de la pollution de l'air intérieur »*). Il s'agit principalement de pathologies du système respiratoire : rhinites, bronchites, asthme, mais aussi de pathologies plus diffuses et spécifiques au bâtiment, notamment le « syndrome du bâtiment malsain », qui se traduit par des maux de tête, une fatigue générale, une irritation des yeux, des nausées.

D'autres pathologies ont été identifiées, notamment des pathologies liées au trouble du comportement. Des études se développent depuis une dizaine d'années sur la capacité de concentration et la capacité d'apprentissage des

enfants et des étudiants : de quelle manière la capacité d'apprentissage peut-elle être impactée par la composition de l'air intérieur dans lequel l'enseignement se déroule. On savait depuis fort longtemps qu'au-delà de 4 000 - 5 000 ppm de CO₂ dans un espace clos, on pouvait ressentir des difficultés de concentration ; on s'aperçoit maintenant qu'il y a une quantité d'autres polluants qui peuvent être concernés. Des études sur ces sujets, réalisées par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux États-Unis, proposent un lien direct entre qualité de l'air intérieur et performances d'acquisition de connaissances.

1.2. Différents types d'exposition aux polluants

Les pathologies variées associées à l'air intérieur sont reliées à des polluants eux-mêmes variés car on a affaire à une « soupe » disparate (*Encart : « Des polluants variés aux effets variés »*). On peut observer des situations d'expositions aiguës, au cours desquelles les effets sur les occupants sont sans appel : il s'agit par exemple d'empoisonnements au monoxyde de carbone (CO) liés à des dispositifs de chauffage par combustion mal réglés et pouvant entraîner la mort des personnes exposées. De manière moins flagrante, on peut observer des expositions chroniques, correspondant à des expositions de longue durée à un cocktail d'espèces – des composés organiques (le formaldéhyde, le benzène) ou des composés issus des éma-

LES IMPACTS SANITAIRES DE LA POLLUTION DE L'AIR INTÉRIEUR

Pathologies du système respiratoire (rhinites, bronchites, asthme) (*Figure 2*) ;

Syndrome du bâtiment malsain : maux de tête, fatigue, irritation des yeux, nausées... ;

Trouble du comportement : études émergentes sur la capacité d'apprentissage des enfants.



Figure 2

Un air intérieur pollué peut conduire à des pathologies variées, notamment du système respiratoire (rhinites, bronchites et asthme).

DES POLLUANTS VARIÉS AUX EFFETS VARIÉS

- **Exposition aiguë** (empoisonnement au monoxyde de carbone CO) ;
- **Exposition chronique** (exposition long terme au formaldéhyde, benzène (Figure 3), radon, composés classés cancérogènes).

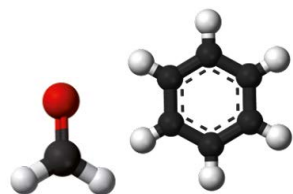


Figure 3

Le formaldéhyde (à gauche) et le benzène (à droite), deux molécules polluantes de l'air intérieur et soumises à des valeurs guides.

nations radioactives du sol comme le radon, ou encore des composés classés cancérogènes, qui sont présents en quantités infimes dans les espaces intérieurs mais qui sont potentiellement dangereux en exposition chronique.

2 Classification des sources de polluants

2.1. Classification selon la nature du polluant

On peut classer les polluants en fonction de leur nature : physiques, chimiques ou microbiologiques (Tableau 1).

Les **polluants physiques** sont plutôt reliés à la matière particulaire : les particules issues de l'industrie, du trafic, des processus de combustion, des poussières aussi pouvant être issues de phénomènes d'abrasion, de re-suspension, qui proviennent parfois de processus naturels, ou encore des fibres telles que l'amiante.

Les **polluants chimiques** observés en air extérieur, comme dans les espaces intérieurs, sont principalement des gaz, les oxydes de carbone (CO et CO₂), les composés organiques volatils (COV), dont certains sont odorants,

Tableau 1

Classification des polluants selon leur nature.

Physique	Particules (industrie, trafic, combustion), poussières (abrasion, re-suspension), fibres (amiantes).
Chimique	Gaz (Composés Organiques Volatils (COV), CO ₂ , CO, O ₃ , NO _x), métaux.
Micro-biologique	Développement de moisissures, propagation de bactéries ou de virus par voie aérienne.

des gaz inorganiques tels que l'ozone (O₃) et les oxydes d'azote (NO_x), voire certains métaux.

Les **polluants microbiologiques** sont issus des développements biologiques qui peuvent se produire dans certains espaces intérieurs, notamment mal ventilés – développement de moisissures par exemple –, ou dans des espaces rassemblant un très grand nombre de personnes, favorisant la propagation de bactéries ou de virus par voie aérienne.

2.2. Classification selon la source du polluant

On peut aussi classer les polluants selon leur source, c'est-à-dire le lieu d'où ils proviennent ([Tableau 2](#)).

Il peut s'agir de **sources ponctuelles**, qui génèrent des bouffées de polluants ; elles sont caractérisées par des temps d'émission très courts mais des doses délivrées parfois importantes. Ce sont des phénomènes observables lors de campagnes de mesures en air intérieur, mais nettement moins pris en compte par rapport aux

sources continues. Les sources ponctuelles peuvent être associées à des phénomènes de combustion, comme le tabagisme en air intérieur, les activités de ménage, l'utilisation de parfum d'ambiance ou les activités de cuisine qui peuvent se dérouler dans des espaces confinés.

Les **sources continues** sont caractérisées par un temps d'émission prolongé, des doses délivrées généralement faibles mais conduisant à une exposition chronique des personnes qui vont occuper les différents espaces intérieurs – l'habitat, les habitacles de véhicules, les rames de trains ou les cabines d'avions. Les sources continues sont souvent associées aux matériaux de construction, de décoration ou de l'aménagement de l'espace intérieur ; leurs émissions étaient presque ignorées il y a encore une dizaine d'années, mais on sait à présent qu'elles sont majeures en termes d'impact sanitaire sur les occupants.

Les polluants de l'air intérieur peuvent aussi provenir des interactions de l'espace

Tableau 2

Classification des polluants selon leur source.

Sources ponctuelles	Caractérisées par un temps d'émission court mais des doses délivrées potentiellement importantes (ménage, tabagisme, combustion, cuisine,...).
Sources continues	Caractérisées par un temps d'émission prolongé et des doses délivrées souvent faibles : exposition chronique (émissions de matériaux de construction et/ou décoration).



Figure 5

L'activité des occupants (ménage, cuisine, désodorisants,...) contribue à l'émission de COV dans les habitats.

qui proviennent à la fois des sources internes et externes. Il peut s'agir de sources continues comme de sources ponctuelles.

Ces COV sont en majorité de la matière carbonée, gazeuse à température et pression ambiantes. Le mélange de ces espèces conduit régulièrement à une toxicité aiguë et souvent à une toxicité chronique. Les études conduites depuis le début des années 2000 par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur en France (OQAI) ont permis de prendre conscience de l'importance de l'exposition des occupants des espaces intérieurs à ce type de polluant. La chimie en est la source principale car les produits d'usage comme les matériaux sont en grande partie issus de l'industrie chimique, mais la chimie peut être un outil de diagnostic (la chimie analytique), et dans l'avenir un outil de remédiation (procédés de traitement).

Les facteurs qui gouvernent la concentration des COV dans l'air sont au nombre de quatre.

2.3.1. Taux d'émission des matériaux et activités des occupants

Le premier déterminant des concentrations en COV dans l'espace intérieur est le taux d'émission des matériaux ou le facteur d'émission des activités des occupants. Les espaces intérieurs, habitats, véhicules, avions, regorgent de matériaux synthétiques à base de colles, de résines, voire de matériaux naturels eux aussi émissifs tels que le bois (**Figure 5**).

Une remarque : les réglementations thermiques qui limitent le renouvellement d'air des espaces intérieurs est aussi cause de concentration des polluants émis par les différents matériaux qui nous entourent.

2.3.2. Le piégeage des COV par les matériaux

Le deuxième déterminant est la capacité des COV à migrer vers d'autres matériaux dont certains, non émissifs, sont au contraire de très bons pièges et peuvent adsorber les COV (**Figure 6**). C'est par exemple le cas de certains plâtres, de certaines peintures et de plusieurs autres matériaux de construction. Ils peuvent avoir pour effet d'atténuer les pics de pollution ; en revanche, en se gorgeant de polluants, ils peuvent dans certaines conditions devenir à leur tour des sources de pollutions secondaires.

Tout un pan de la recherche actuelle dans ce domaine cherche à définir des matériaux de construction innovants (cloisons, murs) avec des propriétés de piégeage des polluants dans les espaces intérieurs. Ces préoccupations ont été consécutives au résultat alarmant des premières campagnes d'observation des COV en air intérieur.

2.3.3. Le taux de renouvellement d'air

Le troisième déterminant est le renouvellement de l'air intérieur (**Figure 7**), qui contribue à l'évacuation des polluants intérieurs, mais permet aussi aux polluants extérieurs de pénétrer.

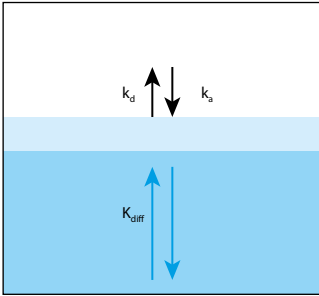


Figure 6

Certains matériaux ont la capacité naturelle de piéger les COV (plâtres, peintures,...). Ils atténuent les pics de pollution, mais deviennent potentiellement des sources ensuite. Le coefficient de sorption représente l'interaction entre un gaz (par exemple un COV) et la surface d'un matériau.

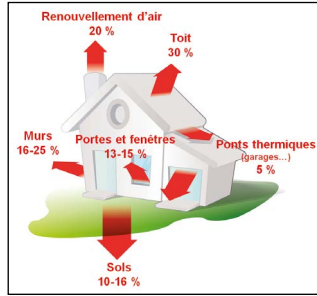


Figure 7

Changer l'air intérieur en apportant de l'air extérieur permet d'évacuer les COV émis par les sources internes, mais introduit les polluants extérieurs (COV, particules et ozone issus du milieu urbain) et induit une perte énergétique massive.

Par ailleurs, on note un conflit essentiel entre les besoins de ventilation pour renouveler l'air intérieur et améliorer sa qualité, vis-à-vis des impératifs d'économies d'énergie qui commandent de restreindre le taux de renouvellement d'air : « je ventile » ou « je respecte les cibles énergétiques » !

2.3.4. La capacité des polluants à se transformer

Le dernier déterminant des polluants en air intérieur est leur capacité à réagir et à se transformer. Une fois qu'ils sont émis, ils ne vont pas forcément rester stables dans le temps et peuvent se transformer soit en phase gazeuse au contact des différents oxydants de l'air, soit au contact des différentes surfaces présentes dans les espaces intérieurs (Figure 8). Actuellement, tout un pan de la chimie de l'air intérieur s'intéresse à étudier les transformations de ces polluants afin de mieux caractériser les polluants

secondaires qui peuvent être produits et d'évaluer leurs toxicités potentielles.

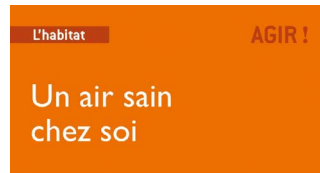


Figure 8

L'ADEME publie un guide de bonne pratique pour une qualité de l'air optimale.

3 Des actions pour la réduction des teneurs en polluants

Les actions pour réduire les teneurs en polluants sont principalement au nombre de trois.

3.1. Réduire les sources de polluants

La première action consiste à réduire les sources. Cela impose un choix judicieux des matériaux introduits dans les espaces intérieurs. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a émis un guide de bonnes pratiques intitulé *Un air sain chez soi* (Figure 8), mais il faut aussi éduquer les acteurs de la filière construction du bâtiment et des aménagements intérieurs tout comme il faut éduquer les consommateurs dans leurs choix de matériaux. Un progrès considérable a été fait en France en 2012 avec l'étiquetage obligatoire

des matériaux pour l'aménagement, la décoration, la construction, de manière à classer ces matériaux pour la construction, l'aménagement et la décoration en les classant selon leur capacité d'émission en composés organiques volatils. Le matériau le plus vertueux serait étiqueté A+, le moins vertueux C (Figure 9). Au moins à présent, le consommateur connaît l'impact de ses choix et de ses achats sur la qualité de l'air qu'il respirera².

3.2. Ventiler les espaces intérieurs

Le deuxième point est l'aération (Figure 10). Il s'agit de concevoir et d'installer des systèmes de ventilation efficaces et qui restent fonctionnels sur le long terme. Les systèmes VMC (ventilation mécanique contrôlée) simple flux qui équipent très majoritairement les bâtiments nécessitent que les ouvertures aient des tailles minimales, que les grilles d'entrées ne soient pas bouchées, que l'entretien soit réalisé régulièrement, qu'ils soient judicieusement situés dans l'espace. Dans plus de 50 % des logements, ces points ne sont pas respectés, les bâtiments sont sous-ventilés et laissent s'accumuler les polluants.

Il faut aussi mentionner une vraie difficulté de principe : l'opposition entre ventilation et économie d'énergie. L'avenir est évidemment à des

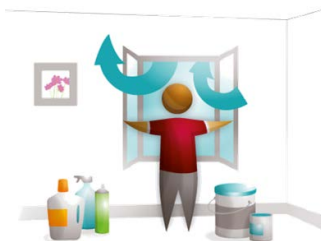
Figure 9

Étiqueter les matériaux de construction est obligatoire depuis 2012, ce qui va permettre aux consommateurs de choisir des matériaux de construction peu émissifs pour un air intérieur sain.



Figure 10

La ventilation joue un rôle crucial pour diminuer la pollution intérieure. Il est important d'informer le grand public sur les bonnes pratiques de ventilation et de maintenance des dispositifs de ventilation : plus de 50 % des dispositifs sont en non-conformité.



2. Voir aussi l'ouvrage *La chimie et l'habitat*, Chapitre de V. Pernelet-Joly, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

systèmes de ventilation plus vertueux, plus innovants, à double-flux avec des « puits climatiques » pour renouveler l'air sans perdre les calories apportées par les systèmes de chauffage des bâtiments en équipant les dispositifs de ventilation d'échangeurs de chaleur (Figure 11).

3.3. Traiter l'air pour l'assainir

La troisième approche pour limiter l'effet des polluants est d'avoir recours à un dispositif de traitement de l'air. Pour les polluants particulaires, la technique la plus répandue est la filtration, elle permet d'éliminer les polluants physiques ou microbiologiques. Souvent, les dispositifs de filtration sont intégrés aux systèmes de ventilation des bâtiments. Les systèmes de traitements intégrés aux centrales de traitement d'air font plus rarement appel à des procédés d'élimination des gaz polluants. Lorsque c'est le cas, sont utilisés parfois des systèmes photocatalytiques, développés récemment avec l'objectif d'éliminer les polluants chimiques et les COV ; néanmoins, les procédés reposant sur l'adsorption restent les plus présents, notamment pour faire face à des problématiques industrielles. Tous ces systèmes ont des limitations. Les systèmes par filtration nécessitent une maintenance, et l'on peut se poser des questions sur leur usage à long terme. Par ailleurs, l'efficacité réelle, et surtout l'innocuité des systèmes photocatalytiques, a été fortement discutée car ils sont

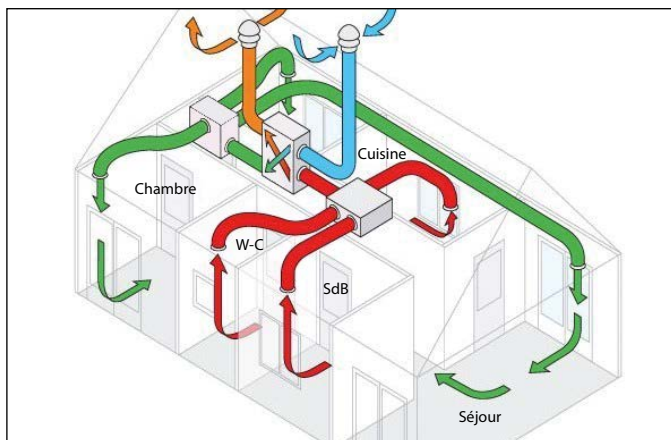


Figure 11

Les systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC) double-flux sont des systèmes de ventilation innovants permettant de renouveler l'air sans perdre de chaleur.

considérés comme potentiellement générateurs de composés organiques secondaires plus toxiques que les COV primaires qui ont été éliminés. Enfin, l'utilisation de matériaux dépolluants fait l'objet de programmes de recherche et développement, notamment la fonctionnalisation de plâtres, de peintures ou de différents matériaux de construction qui ont intrinsèquement des propriétés de piégeages, pour les améliorer en augmentant leur durée de vie, et ainsi assurer l'épuration de l'air intérieur sur un temps long.

Une remarque sur les systèmes de traitement d'air : il n'existe actuellement pas de norme contraignante qu'un système de traitement d'air intérieur doive satisfaire avant sa mise sur le marché. Les normes existantes restent purement informatives et permettent mal le classement des dispositifs les uns par rapport aux autres. Cela signifie que l'on peut acheter un dispositif de traitement d'air sans qu'il ne présente de garantie de capacité de traitement.



Figure 12

L'étiquetage des matériaux de construction et de décoration, à la charge des producteurs (essais par des laboratoires accrédités COFRAC), est obligatoire depuis le 1^{er} janvier 2012. Les émissions sont classées de A+ à C et les COV totaux sont indiqués (formaldéhyde, acétaldéhyde, toluène, éthylbenzène, xylène, styrène, triméthylbenzène, tétrachloroéthylène, dichlorobenzène, butoxyéthanol,...).

4 De nouvelles incitations réglementaires

Les incitations réglementaires sont indispensables pour faire changer les comportements. Les premières sont issues du PNSE 2 (Plan National Santé Environnement mené entre 2009 et 2013) et la loi Grenelle 2 liée à l'étiquetage des matériaux qui a été vraiment une grande avancée, un premier pas (Figure 12).

Le deuxième point en matière de réglementation est encore en suspens : c'est la surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans les lieux recevant du public (Figure 13). Le protocole de test est en place mais la mise en œuvre à une telle échelle massive pose des questions : dispose-t-on des ressources opérationnelles et techniques suffisantes ? Les établissements concernés sont-ils aptes à



Figure 13

La surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les lieux recevant du public devient obligatoire, niveau de confinement et définition de seuils à la charge des collectivités, des propriétaires des lieux (essais sur le terrain par des laboratoires accrédités par COFRAC), avec obligation de mise en place d'actions correctives. L'application était initialement prévue en 2015 pour les crèches et écoles, mais l'échéancier a été repoussé.

assumer le coût des analyses ? Avons-nous suffisamment de laboratoires pour les dizaines de milliers de mesures à assurer sur un temps court ? Il y a de vraies questions de mise en œuvre qui s'ajoutent aux questions techniques à résoudre avant de déployer les dispositifs et les équipes nécessaires sur le terrain. C'est une des raisons qui a conduit à ce que le décret d'application de cette surveillance obligatoire ne soit pas encore paru.

Le dernier point est qu'il convient d'élaborer des valeurs guides sur l'exposition liée à l'air intérieur. Cela fait l'objet de recherches avec l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) sur l'impact sanitaire des polluants. Il faut que l'on puisse savoir si ces valeurs mesurées ou les valeurs recommandées sont bonnes, mauvaises, acceptables, ou nécessitent une remédiation particulière.

5 De la recherche en cours sur la qualité de l'air

L'Institut Mines Télécom, IMT Lille Douai, Département SAGE, en collaboration avec l'ADEME, a conduit un projet de recherche qui a permis entre autres de créer en laboratoire un système permettant de reproduire les conditions réelles de l'air intérieur tout en maîtrisant l'ensemble des phénomènes qui peuvent se produire (Figure 14). Au lieu de multiplier les actions sur le terrain pour tenter de dégager une vision globale de ce qu'on peut trouver dans le parc français, comme cela a été fait

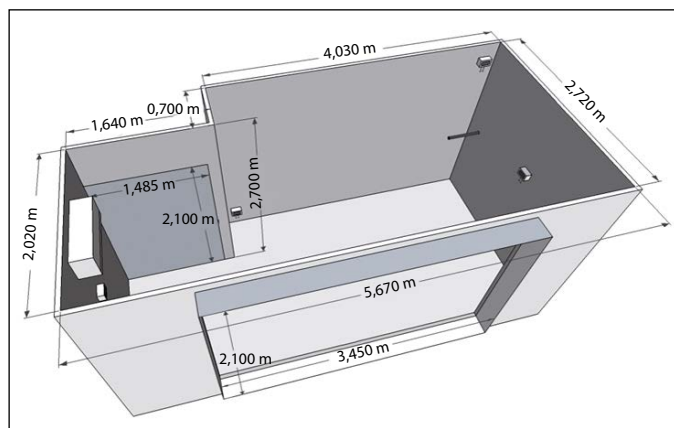


Figure 14

Simulation de la physico-chimie de l'air intérieur. Un dispositif de taille réelle, une pièce expérimentale élaborée à l'IMT Lille Douai, Département SAGE, pour étudier l'ensemble de la physico-chimie de l'air intérieur à l'échelle 1 en condition réelle : émissions par des matériaux ou des activités, transfert et réactivité des polluants, exposition des occupants, rôle des matériaux de constructions, tests de dispositifs de traitement de l'air intérieur, etc.

dans les années 2000-2015, une autre approche consiste à étudier en laboratoire la chimie de l'air intérieur à l'aide d'une pièce expérimentale de taille réelle (40 m³) permettant de reproduire les phénomènes caractéristiques de l'air intérieur : l'émission des matériaux, les activités des occupants, le transfert et la réactivité des polluants, l'exposition, le rôle des matériaux à la fois en termes de puits ou de sources ; on peut aussi y tester des systèmes de traitement d'air de toute nature afin d'en évaluer l'efficacité. Cette pièce expérimentale unique s'appelle IRINA pour *Innovative Room for Indoor Air studies*.

Notre pièce expérimentale fait 12 m² et 40 m³, elle est complètement instrumentée ; on y contrôle le renouvellement d'air, la température, l'humidité, le taux de CO₂, et

l'on peut y générer presque n'importe quelle atmosphère caractéristique des espaces intérieurs de manière ponctuelle ou continue (Figure 15).



Figure 15

Irina, une pièce expérimentale pour la recherche sur l'air intérieur. Taux de renouvellement stabilisé à $0,30 \pm 0,1 \text{ h}^{-1}$; système de climatisation autonome fermé ; mesure continue de la température, de la concentration en CO₂ ; système d'injection/vaporisation de COV ($50 < C_{inj} < 500 \text{ ppb}$, ponctuel ou continu) ; murs revêtus d'aluminium (pas de source interne de COV et puits de COV minimisés) ; homogénéité des concentrations en COV validée dans l'ensemble de la pièce ; mesure des concentrations en COV dans la pièce (On line : SIFT-MS ; Off line : TD-GC-FID+MS / HPLC).

On peut aussi insérer dans Irina des systèmes de traitement d'air de taille réelle, caractériser et reproduire différents milieux intérieurs et ainsi alimenter des modèles pour améliorer nos connaissances, et être plus efficace pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

L'air intérieur : l'affaire de tous les acteurs de la ville

Si la problématique de l'air intérieur concerne la chimie, puisque cette science est d'une certaine manière à la fois l'origine de la problématique de la pollution de l'air intérieur mais aussi la clé pour y remédier, elle concerne particulièrement le milieu urbain et sa concentration massive de polluants. Les pistes à creuser dans l'avenir pour lutter contre cette pollution impliquent des collaborations avec les différents métiers et acteurs du domaine, depuis la conception (c'est-à-dire les architectes) jusqu'aux différents entrepreneurs, qui interviennent dans le domaine du bâtiment, et aux équipes qui travaillent sur la caractérisation et les solutions de remédiation. L'amélioration de la collaboration passe entre autres par une sensibilisation des différents acteurs à la problématique de l'air intérieur, un enjeu pris en compte à l'IMT Lille Douai puisque les élèves ingénieur de l'option Bâtiment à Énergie positive reçoivent une formation avancée à la qualité de l'air intérieur afin de les sensibiliser à cet enjeu transversal.

C'est en tissant ces ponts interdisciplinaires et en informant le grand public qu'on parviendra à améliorer la qualité de l'air intérieur, même en milieu urbain.