

CVC

CONDITIONNEMENT D'AIR

CHAUFFAGE

VENTILATION

LE DOSSIER DES CLIMATICIENS

www.aicvf.org

Mars 2021

La Qualité de l'Air
Intérieur s'affirme
de plus en plus
comme un enjeu
de société

EXTRAIT
DU N° 911
DE CVC

La Qualité de l'Air Intérieur s'affirme de plus en plus comme un enjeu de société

Dans les bâtiments, et notamment dans le tertiaire, elle devient le marqueur de la sécurité sanitaire et du bien-être des personnels. La possibilité de mesurer désormais, à faible coût, la concentration des principaux polluants de l'air, d'afficher leur valeur ins-

stantanée, et d'enregistrer leurs chroniques sur de longues périodes bouleversent les pratiques. La QAI devient une donnée objective pour l'occupant ou le gestionnaire d'un établissement, un paramètre quantifiable lors de l'audit d'un bâtiment, un objectif et une exigence pour la conception des installations CVC.

Dossier coordonné par Christian Feldmann et Pierre Picard



Mesure de la qualité de l'air intérieur, état des lieux

→ La qualité de l'air, un droit nouveau, une prise de conscience collective.

La prise de conscience des atteintes que le développement des sociétés industrielles et post-industrielles impose à l'Environnement, les campagnes multiples d'information par les media en matière de pollution atmosphérique ont sensibilisé l'opinion publique à la qualité de l'air. Les dispositifs mis en place par les Pouvoirs Publics dans le cadre de la loi sur l'Air de 1996, instituant le principe d'un droit reconnu à chaque citoyen de respirer un air qui ne soit pas nuisible à sa santé, ont contribué par ailleurs à développer les campagnes de mesures.

En outre, les travaux de l'Organisation Mondiale de la Santé et, en France, la mise en place de l'OQAI ont montré que la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) constituait en soi un challenge majeur.

On doit également citer les dispositions réglementaires prises en France ces dernières années pour contrôler la QAI dans certains ERP.

Parallèlement, les progrès en matière de technologie des capteurs (semi-conducteur, sources Laser, IR, UV...), le développement des circuits numériques miniaturisés (micro chips) pour le traitement, le stockage et la transmission des données numériques ont permis l'éclosion de diverses technologies de capteurs et la réduction de leur coût.

Il convient de préciser que ces dispositifs ne sont pas des appareils de laboratoire avec lesquels ils ne peuvent pas rivaliser en termes de précision et de stabilité dans le temps. Cependant, leurs performances sont en progression constante et grâce à leur coût abordable, il est possible de les installer sur les sites en fonctionnement continu. Ainsi, ils deviennent des outils précieux pour s'assurer de l'obtention d'une QAI satisfaisante dans les locaux à occupation humaine.

Il faudrait noter que la mesure en continu à l'aide de ces capteurs, devrait être complétée par des mesures plus fines, ciblées et précises à l'aide des appareils d'expertise et des prélèvements passifs et actifs périodiques (voir l'article "La surveillance de la qualité de l'air intérieur").

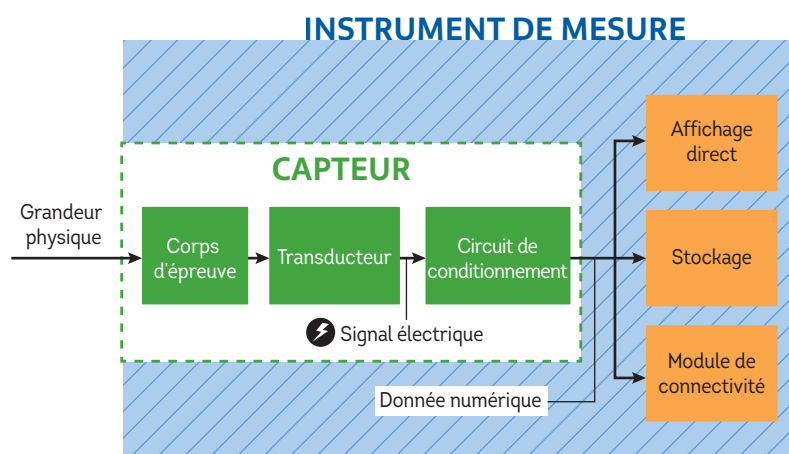
Les principaux polluants de l'air intérieur

De multiples substances sont présentes dans l'air intérieur des bâtiments sous différentes formes, gazeuse ou en aérosols. On distingue les polluants chimiques, les polluants physiques, les polluants biologiques, dont on trouvera une description sommaire dans l'article, dans ce même dossier, de

Mireille Rahmeh « La surveillance de la qualité de l'air intérieur ».

La mesure des polluants - les capteurs

Par abus de langage, nous assimilons souvent " capteur " à " instrument de mesure ". Un capteur est un composant permettant de convertir une grandeur physique en un signal analysable (analogique, numérique et logique). Il fait partie d'un instrument de mesure mais ce dernier inclut également un système de lecture, de stockage et/ou un module de connectivité.

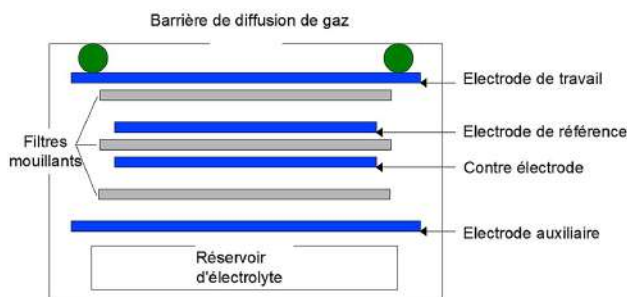


Pour la mesure des polluants de l'air, nous utilisons généralement des capteurs actifs qui sont constitués d'un corps d'épreuve, un traducteur et un circuit de conditionnement (voir figure ci-dessus).

- **un corps d'épreuve**, encore appelé élément sensible, réagit sélectivement aux paramètres censés être mesurés (mesurande) ;
- **un transducteur** dont la fonction est de transformer l'interaction entre la mesurande et le corps d'épreuve en un courant électrique ;
- **un circuit de conditionnement** qui a pour fonction d'amplifier le signal électrique fourni par le transducteur et de le conditionner sous une forme standard (tension ou courant) ou encore de le numériser à des fins de traitement, d'enregistrement ou de transmission.

Un capteur se définit par plusieurs caractéristiques métrologiques dont la précision, la sélectivité, la reproductibilité, la répétabilité, la dérive, etc. La consommation énergétique et le coût sont également des paramètres essentiels lors du choix du capteur.

>>>



Capteur électro-chimique

Les principaux types de capteurs

On se propose ici de passer en revue les principaux types de capteurs destinés à la mesure de différents polluants de l'air. Il s'agit d'appareils de terrain destinés à assurer in situ le suivi des concentrations des principaux polluants de l'air, soit à l'extérieur soit à l'intérieur des bâtiments.

• Capteurs électrochimiques

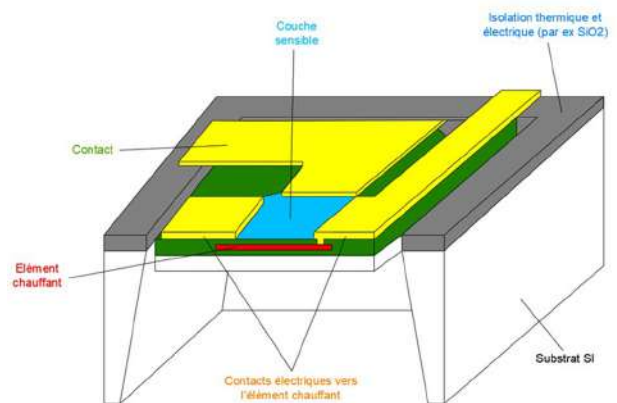
Ces capteurs sont équipés d'une membrane semi-perméable permettant le passage sélectif de l'analyte dont on veut mesurer la concentration dans l'air. Ce polluant est mis en contact avec un électrolyte. La réaction électrochimique génère un signal électrique, recueilli par un jeu d'électrodes sous forme de tension ou de courant électrique, représentatif de la concentration du polluant dans l'air. Ils sont utilisés pour des mesures des polluants gazeux tels que CO, H₂S, NO₂, O₃

Présentant une bonne sensibilité et stabilité dans le temps, ce type de capteur a cependant une faible sélectivité et une importante sensibilité aux conditions ambiantes (température, humidité, pression...). Des dérives de mesure peuvent être constatées avec le temps. Ainsi, un étalonnage régulier est nécessaire.

• Capteurs à semi-conducteurs (Oxyde Métallique MOx)

L'élément sensible de ce type de capteur est constitué d'une couche d'un matériau semi-conducteur (SnO₂, ZnO₂) dont la conductivité électrique dépend à la fois de sa conductivité intrinsèque et de celle de la composition du milieu gazeux avec lequel il est en contact.

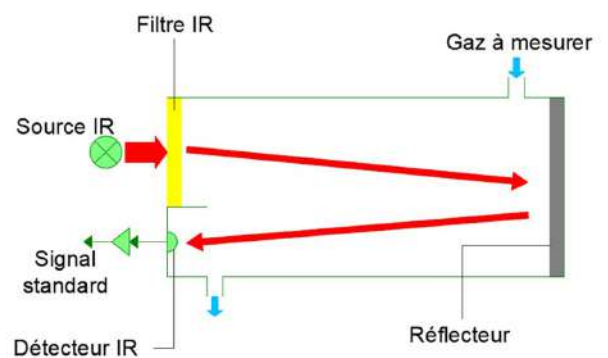
Les défauts du réseau cristallin, caractéristiques des oxydes métalliques semi-conducteurs, permettent de modifier la conductivité du matériau en fonction de la nature du gaz adsorbé à leur surface. Présentant une faible sélectivité mais facile à concevoir et peu coûteux, ces capteurs sont largement utilisés dans des applications simples : pot d'échappement et habitacle des automobiles, contrôle de respect des normes antipollution dans l'industrie, etc. Dans l'air intérieur, ces capteurs sont utilisés pour mesurer la concentration des polluants gazeux tels que les COVT de laquelle ils déduisent une concentration équivalente du CO₂



Capteur à semi-conducteurs

• Capteurs à infrarouge

De nombreux gaz présentent des propriétés d'absorption dans certaines bandes de l'infrarouge du rayonnement électromagnétique. Cette atténuation énergétique est fonction de la concentration d'un gaz donné. C'est cette propriété qui est utilisée dans ce type de capteurs.

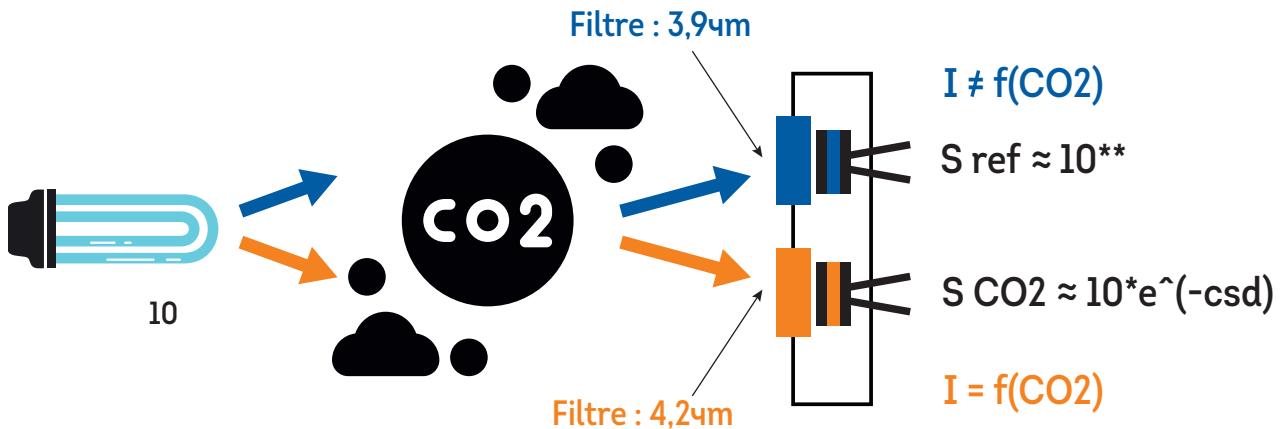


Principe d'un capteur à infrarouge

Ils sont peu sélectifs pour les gaz (hormis CO₂) et les valeurs mesurées dérivent lentement. Ces dérives peuvent être compensées par le recours à des algorithmes de type ABC (Automatic Background Calibration) qui réinitialisent régulièrement la valeur de référence du capteur par rapport à la valeur minimale de référence. Par exemple, dans le cas du CO₂, la concentration de fond dans l'atmosphère générale est de l'ordre de 390 ppm. Toutefois, l'expérience montre que ce type de compensation ne convient pas aux ambiances dont la concentration varie peu, comme dans les chambres d'un hôpital par exemple.

Il existe plusieurs types de capteurs IR tels que les capteurs FTIR (Fourier Transform Infrared), NIR (Near-Infrared) et les capteurs infrarouge non dispersive NDIR (non-dispersive infrared). Ces derniers, dont le principe est présenté par le schéma ci-dessous dominant le marché du capteur de CO₂ utilisé pour piloter les systèmes CVC.

CAPTEUR DOUBLE BANDES



La technologie NDIR

Le rayonnement émis par la lampe source est capté à travers deux filtres :

- Le premier dans une bande de fréquence (longueur d'onde 3.9 μm), qui n'est pas affectée par le gaz traversé, constitue la référence.
- Le second (longueur d'onde 4.2 μm) correspond à la valeur moyenne de concentration du gaz analysé

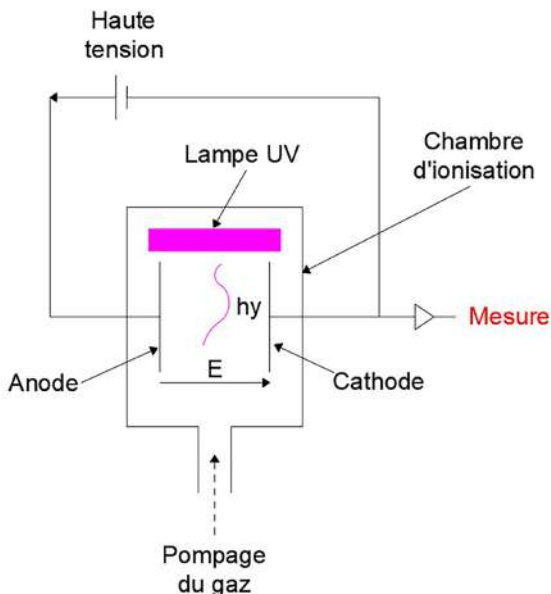
• Capteur à détection par photoionisation (PID)

Le sigle PID vient de l'anglais Photo Ionisation Detector (que l'on ne confondra pas avec les modes d'action des régulateurs en automatisme).

Sous l'effet d'un rayonnement UV les molécules du gaz à analyser se transforment en ions positifs et négatifs. Ces ions génèrent un courant électrique entre les deux électrodes (cathode et anode) dont l'intensité est fonction de la concentration de l'analyte.

Ce courant est ensuite amplifié et numérisé pour exploitation.

Les détecteurs PID sont les plus utilisés pour la détection des COV grâce à leur très bonne sensibilité. Ils nécessitent toutefois une calibration régulière.

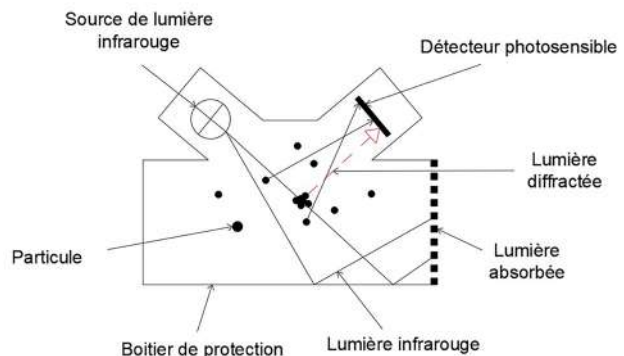


Principe d'un détecteur PID

• Capteur optique

Les particules fines présentes dans l'air, PM (pour Particulate Matter en anglais) sont détectées par des capteurs optiques souvent désignés par le sigle OPC (Optical Particle Counter). Le flux de l'air à analyser est introduit dans une chambre de mesure et soumis à l'éclairement d'une source d'infrarouge (diode laser). Chaque particule ainsi éclairée diffracte une partie du rayonnement incident vers un détecteur photosensible (photodiode).

Le signal de sortie du détecteur est lié à la taille des particules et à leur nombre. Le traitement du signal recueilli aux bornes du détecteur permet de différencier la taille et le nombre des particules ayant traversé la chambre de mesure sur un laps de temps donné.



Principe de fonctionnement d'un capteur de particules et exemple de réalisation (doc. Nanosense)

Performances des différents types de capteurs

La performance des capteurs et leur qualité métrologique sont caractérisées par les paramètres suivants :

- la **sélectivité du composé cible** (analyte) dans un mé- >>>

| TYPE DE CAPTEUR | TYPE D'ANALYTE | DOMAINE DE MESURE | AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|--|---|
| Electro-chimique | No, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO | 1 à 1000 µmol/mol | Bonne sensibilité | Sensibilité aux autres substances présentes |
| Détecteur à photoionisation (PID) | Composés organiques et inorganiques(COV) | 1 à 1000 µmol/mol | Bonne sensibilité | Sensible à la pollution particulaire et HR élevée |
| Semiconducteurs (MOx) | COVT, NO ₂ , O ₃ , CO | 0 à 1000 µmol/mol | Faible coût, temps de réponse court | Manque de sélectivité |
| Infrarouge (NDIR) | CO ₂ | 350/2000 µmol/mol (CO ₂) | Bonne sélectivité et sensibilité. Temps de réponse court | Sensibilité à T, HR et P Dérive avec le temps et nécessite une autocalibration |
| Mesure optique (IR) | PM | | Temps de réponse court | Sensibilité à l'encrassement, à la taille, la forme et la couleur des particules |

large de différents polluants

- **la sensibilité de détection** des niveaux faibles du composé cible
- **la reproductibilité dans le temps** dans des conditions d'ambiance différentes
- **le temps de réponse** vis à vis de la vitesse de variation du composé cible
- **la robustesse du dispositif de mesure**

On trouve dans la littérature technique les principales caractéristiques de ces matériels.

Elles sont rassemblées dans le tableau ci-dessus ●

Christian Feldmann, consultant, membre AICVF et membre du comité de la revue CVC
Mireille Rahmeh, responsable technique et Digital du pôle de Compétences AIR de VEOLIA



Quelques références bibliographiques

- Veille technologique sur les capteurs pour les mesures de polluants de l'air ambiant (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air - LCSQA2018)
- <http://www.slg-instruments.com/capteur-COV.php>
- un matériau unique pour détecter le formaldéhyde ([lien](#))
- Les technologies de capteurs infrarouges et leur impact sur la précision de la mesure du CO₂ dans les applications CVC ([lien](#))
- DRC_18_174307_09689A / 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAµC) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des Résultats
- Suivi de pollution atmosphérique par systèmes multi-capteurs Thèse ENSM Saint Etienne ([lien](#))
- Cours « Capteurs » Raoul Herzog Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

RGE: le renforcement des critères de qualification et des contrôles

Pour rénover énergétiquement leur logement, les Français peuvent bénéficier d'aides financières (MaPrimeRénov', éco-prêt à taux zéro, les CEE, aides de l'Anah...), cependant ils doivent faire appel à un professionnel qualifié RGE.

Un certain nombre de changements sont intervenus depuis le 1/1/2021 pour garantir une meilleure qualité des travaux et lutter contre les pratiques frauduleuses ou abusives dans le domaine de la **rénovation énergétique** :

Pour mieux identifier les professionnels et fiabiliser le dispositif, les catégories de travaux et les domaines de compétences associés sont précisés, passant ainsi de 12 catégories RGE à 19 au 1^{er} janvier 2021.

Parce que le **label RGE se doit d'être un gage de fiabilité, de compétence et de qualité**, les pouvoirs publics ont décidé de **renforcer les mesures de contrôle et les sanctions en cas de pratiques déviantes.**

Pour améliorer les contrôles d'audit, il est important que les auditeurs **puissent accéder aux travaux de rénovation énergétique.** Pour renforcer ces contrôles et améliorer le gage de fiabilité du label RGE,

les particuliers doivent leur permettre d'effectuer des contrôles au sein de leur habitat.

Les chantiers seront davantage contrôlés, en particulier ceux jugés « critiques » :

- Appareils de chauffage au bois
- Pompes à chaleur
- Isolation des combles perdus et des planchers bas.

Deux nouvelles qualifications seront mises en place en 2021 :

Borne de recharge pour véhicules électriques

Ventilation +

La mise en place d'une qualification RGE pour la ventilation et donc l'accès à MaPrimeRénov' pour la VMC. La qualité de l'air intérieur, parent pauvre de la rénovation énergétique, victime de l'étanchéité des bâtiments surtout lors de travaux de rénovation, acquière enfin une notoriété et devrait amener à développer une filière. Les critères de qualification des installateurs portent essentiellement sur les moyens techniques et humains, la formation, l'expérience et la qualité des installations.

Bertrand Montmoreau

La surveillance de la qualité de l'air intérieur

➔ **Plus que jamais, la qualité de l'air intérieur est aujourd'hui un sujet majeur d'actualité et un enjeu de santé publique. Les études prouvant la transmission du SARS-COV-2, le virus responsable de la maladie Covid-19, par voie aérienne ont mis en évidence l'importance d'une bonne qualité de l'air intérieur à assurer par l'augmentation des taux de renouvellement d'air et des niveaux de filtration.**

Contribuer au respect des enjeux sanitaires et énergétiques

Ces actions engendrent naturellement une augmentation de la consommation énergétique et de l'inconfort des occupants, en contradiction avec les préoccupations écologiques tout autant d'actualité. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre pour garantir des bâtiments sains mais performants énergétiquement. Pour y parvenir, les décideurs ont besoin d'indicateurs de performance calculés à partir des paramètres principaux tels que la température, l'humidité, le dioxyde de carbone, les particules fines, la consommation électrique des centrales de traitement de l'air, etc. La surveillance de la qualité de l'air est dans ce contexte un outil d'aide à la décision permettant de collecter les informations, établir les constats et trouver des solutions.

La pollution de l'air dans les bâtiments (habitations, bureaux, salles de sports, établissements éducatifs, etc.) provient de plusieurs sources. Les sources intérieures sont les occupants, leurs activités, les meubles, les matériaux de construction, les produits ménagers, etc. Les sources extérieures sont la pollution atmosphérique et la pollution radioactive émanant du sol. Le niveau de cette pollution dépend de la puissance et la nature des sources ainsi que des conditions hygrothermiques. Certaines sources, comme les matériaux de construction, dégagent des polluants en continu et à faibles concentrations (les émissions peuvent diminuer ou augmenter au cours du temps) tandis que d'autres, liées par exemple aux activités des occupants, ont des émissions intermittentes et potentiellement plus fortes. Enfin, la température et l'humidité contribuent à la variation des concentrations de certains polluants tels que les composés organiques volatils.

Polluants de l'air intérieur

Ces polluants peuvent être de nature chimique, biologique et physique.

LES POLLUANTS CHIMIQUES :

• **Les composés organiques volatils (COV)** que l'on trouve dans les bâtiments (formaldéhyde, benzène, décane, limonène, styrène, toluène, butoxyéthanol, etc.) proviennent

principalement des matériaux d'aménagement et de décoration (peinture, vernis, adhésifs...), du mobilier, des produits d'entretien, des désodorisants.

• **Les composés organiques semi-volatils COSV** (Phtalates, HAP, muscs, etc.) sont générés principalement par les revêtements, les produits de traitement du bois, les retardateurs de flamme.

• **Les composés inorganiques** tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx) et le dioxyde de soufre (SO₂) résultent de la mauvaise combustion d'une cheminée à foyer ouvert et des chaudières à fuel, des gazinières dans les cuisines, de la fumée de tabac et de la pollution extérieure. Le dioxyde de carbone (CO₂) est quant à lui généré essentiellement par la respiration des occupants et il est considéré comme un indicateur du renouvellement de l'air.

LES POLLUANTS BIOLOGIQUES :

- **Les allergènes** tels que le pollen, les poils d'animaux domestiques, les acariens, certains spores émis par les moisissures
- **Les moisissures** (hors allergènes) émettrices de COV ou de mycotoxines
- **Les virus et les bactéries**

LES POLLUANTS PHYSIQUES :

- **Les gaz radioactifs** (le radon)
- **Les particules fines et ultra-fines** communément connues par la dénomination PM (PM1, PM2.5 et PM10), introduites principalement par l'air extérieur mais pouvant être produites à l'intérieur par l'activité humaine (fumée du tabac et cuisson des aliments)
- **Les fibres** (amiante et les FMA-fibres minérales artificielles). Ce sont des particules de forme allongée. L'usage de l'amiante est désormais interdit mais les FMA sont largement utilisées dans les isolants thermiques. Elles ont un pouvoir de persistance plus faible que l'amiante dans les tissus pulmonaires.

L'HUMIDITÉ RELATIVE N'EST PAS UN POLLUANT EN SOI MAIS DOIT ÊTRE CONSIDÉRÉE :

à des niveaux trop élevés comme condition favorisant le développement de certains polluants tels les moisissures, >>>

les bactéries et les acariens **à des niveaux trop faibles** pour ses conséquences néfastes sur la santé (problèmes respiratoires, irritation des yeux, gorge sèche, saignement de nez...).

Détection des polluants de l'air

La surveillance et l'évaluation de la qualité de l'air intérieur se fait d'une manière fine et précise à l'aide de prélèvements passifs (tubes absorbants) ou actifs (pompe) réalisés sur une durée déterminée, sur lesquels sont cherchés, en laboratoire, de manière ciblée, certains composés. Elle peut également se faire à l'aide d'appareils de mesure en temps réel sur une courte durée et en continu. Ces appareils permettent d'enregistrer un nombre limité de paramètres, avec plus ou moins de précision et de spécificité selon le produit utilisé. Nous pouvons les classer ainsi en quatre catégories :

- **Les appareils de référence** sont très précis et fiables mais leur coût (plusieurs dizaines de milliers d'euros) et leur encombrement les limitent aux laboratoires
- **Les appareils d'expertise**, portables ou fixes, sont utilisés pour des mesures en temps réel, d'une durée déterminée, par des laboratoires, des industriels et des bureaux d'études car ils restent coûteux (plusieurs milliers d'euros) et nécessitent un calibrage annuel.
- **Les appareils à usage commercial (BtoB)**, destinés au monde professionnel, sont utilisés principalement pour mesurer la qualité de l'air sur de longues périodes et piloter les systèmes d'aération. Préférentiellement, ils sont installés de manière fixe. Ces appareils coûtent plusieurs centaines d'euros.
- **Les appareils grand public (BtoC)** sont destinés aux particuliers qui peuvent ainsi avoir des indications sur la qualité de l'air de leur domicile pour quelques dizaines d'euros. Étant donné que la qualité de l'air est une résultante de l'interaction entre plusieurs paramètres (température, humidité, débit d'émission des sources, débit de ventilation, etc), il est important de suivre en continu l'évolution des paramètres essentiels de l'air tels que le CO₂ (indicateur du taux de ventilation), la température avec l'humidité relative (indicateur de confort thermique) et les particules fines (indicateurs d'efficacité de filtration). Les appareils utilisés à cette fin sont le plus souvent les appareils à usage commercial ou les appareils grand public qu'on voit de plus en plus fleurir sur le marché. Ces appareils regroupent souvent plusieurs capteurs de différentes technologies (voir article "*Mesure de la qualité de l'air intérieur, état des lieux*") et communément appelés "microcapteurs" ou "microstations" de mesure OAI (voir image ci-dessous).

Ils disposent parfois d'un écran d'affichage avec une signalétique lumineuse pour indiquer l'état synthétique de la OAI dans les locaux (bon, moyen, mauvais), d'un accès, pour le personnel autorisé, à l'historique des mesures sur une période donnée et de moyens de transmission des données vers les serveurs des clients (API).

Cependant, les technologies disponibles à ce jour sont limitées en termes de précision (les appareils à usage commercial permettent des mesures relatives et les appareils grand public ne permettent que des mesures indicatives) et de spécificité de détection. Il faut alors les compléter par des audits ponctuels et périodiques.

De la détection à l'action

Comme nous venons de le voir, l'objectif principal du monitoring de la OAI est de contribuer à la garantie d'un environnement sain et confortable pour les occupants. C'est un outil d'aide à la décision qui, pour être pertinent, nécessite la collecte des bonnes informations, grâce à une démarche globale, allant du choix du matériel à l'exploitation des données.

CHOIX DES MICROSTATIONS

Les critères de sélection sont conditionnés, entre autres, par le choix des paramètres pertinents à mesurer, la précision et la robustesse de l'appareil, la typologie du bâtiment, les exigences et les normes locales.

Lors du choix de la microstation, il faut également prendre en compte la couverture du réseau de communication dans le bâtiment qui aura un impact important sur la disponibilité de la donnée mesurée. On peut trouver sur le marché, les modes de communication suivants : technologies cellulaires (3G, 4G, 5G, LTE-M, NB-IoT), WiFi, Sigfox, LoRa/LoRaWAN, EnOcean, Zigbee. Chaque technologie présente des avantages et des inconvénients (force de pénétration dans les matériaux de construction, puissance consommée, facilité de mise en place, coûts par capteur, coûts fixes liés à l'ajout des passerelles, des routeurs...) dont il faut tenir compte en fonction des situations.

MISE EN PLACE DES MICROSTATIONS

La distribution des points de mesure dans le bâtiment doit se baser sur un plan d'échantillonnage bien étudié afin de couvrir le maximum de surface avec un nombre réduit de capteurs, afin d'optimiser le budget. Pour ce faire, l'expertise métier est donc fondamentale.

La représentativité des données est très dépendante du positionnement des équipements dans les pièces : un capteur à proximité d'une fenêtre ou d'un diffuseur d'air, dans une zone de stagnation, loin de la zone d'occupation, ne représente pas l'air respiré par les occupants.

GESTION DE DONNÉES

Les données brutes remontées par les appareils de mesure ne sont pas suffisantes en soi. Elles doivent être complétées par des informations de contexte telle que la localisation, pré-traitées et stockées dans une base pour être exploitées.

Le traitement des données permet de construire des indicateurs de performance adaptés à chaque utilisateur (exploitant, gestionnaire, occupant).

MISE À DISPOSITION DES DONNÉES

Afin que le monitoring OAI permette d'agir et participe à la sensibilisation des occupants, les données doivent être accessibles à travers des outils adaptés aux différents utilisateurs : des tableaux de bord, des applications métiers (affichage en temps réel, rapport automatique périodique, etc.) et de notifications (alertes et recommandations).

Mireille Rahmeh, responsable technique et digital du pôle compétences Air de Veolia
Christian Feldmann, consultant, membre AICVF et membre du comité de la revue CVC



Le monitoring de la qualité de l'air intérieur et extérieur, une fonctionnalité nécessaire des bâtiments et des systèmes de traitement d'air

L'approche de la métrologie de la qualité de l'air intérieur (QAI) dans les bâtiments doit intégrer des paramètres variés, qualifiant l'air extérieur comme intérieur. Seule une analyse globale, s'appuyant sur une configuration adaptée de la métrologie à mettre en place, permet un pilotage efficace des équipements de traitement d'air.

Les polluants identifiés : origine et impacts

Un focus est ici fait sur 3 polluants fondamentaux : Formaldéhyde (HCHO), Dioxyde d'azote (NO₂), particules fines (PM). Les spécificités de ces trois familles de polluants viennent, pour partie, de leur origine : interne, externe ou mixte. La configuration de la métrologie ainsi que la conception du système de traitement d'air doivent en découler.

• Formaldéhyde (HCHO)

Les sources de formaldéhyde dans l'air intérieur sont variées (matériaux, produits d'entretien, cosmétiques). Le formaldéhyde est classé par le Centre International de Recherche sur le Cancer comme « substance cancérigène avérée pour l'homme ». Ses effets sont du type irritation, fatigue ou céphalées. La durée d'exposition entre également en ligne de compte. L'effet cancérigène du formaldéhyde, est identifié par l'ANSES comme l'effet critique le plus sensible lors d'une exposition chronique.

On retiendra pour les valeurs guides et valeurs limites ce qui est précisé dans le guide pratique du Décret no 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

• Dioxyde d'azote (NO₂)

Le NO₂ est un gaz qui est lié aux combustions, donc exclusivement extérieur pour le tertiaire (trafic routier, sources industrielles, etc.). Les effets sanitaires sont : irritations au niveau des voies respiratoires : essoufflements, obstructions bronchiques, crises d'asthme ou encore bronchites.

L'ANSES énonce que ce polluant est communément admis comme un indicateur pertinent de la pollution de l'air extérieur, et en donne des valeurs limite d'exposition.

• Les particules fines (PM)

L'impact des particules fines et ultrafines sur la santé humaine est lié à la profondeur de pénétration de celles-ci dans l'appareil respiratoire, voire circulatoire ou même neurologique. Une particule inerte peut également être associée à un agent biologique ou chimique, et ainsi accroître sa toxicité. Elle peut également se présenter comme un aérosol chargé de bio-contaminants. Limiter la charge particulaire dans l'air diminue donc, par voie de conséquence, la concentration de l'ensemble des polluants.

Les valeurs guides faisant références sont celles de l'OMS précisées dans les « Air Quality Guidelines » en 2005.

Une approche QAI normative et réglementaire

Même si, malheureusement pour la qualité sanitaire des bâtiments, la RE2020 n'intègre pas d'objectifs QAI clairs, quelques textes font référence. En exemples on peut citer la norme NF EN 16798 et le référentiel de certification WELL.

• La norme NF EN 16798 – Performance énergétique des bâtiments / Ventilation des bâtiments

Cette norme évoque la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant de manière globale : la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique.

Les valeurs cibles de l'OMS sont utilisées comme référence. La QAI est identifiée comme fortement imbriquée avec la performance des systèmes de traitement d'air, et donc par voie de conséquence avec la signature énergétique des bâtiments.

Le contrôle ainsi que l'exploitation des systèmes CVC sont décrites : >>>

- Diagnostic instrumenté afin de déterminer les polluants de l'air intérieur
- Intégration des polluants en données d'entrée des algorithmes de contrôle du système de traitement d'air
- Monitoring des critères QAI afin de vérifier l'efficacité du système de traitement d'air.

Si l'air extérieur est de plus mauvaise qualité chimique que l'air intérieur, une filtration moléculaire dans les CTA d'air neuf est nécessaire. Les chaînes de filtration sont définies en fonction de la qualité de l'air extérieur et des objectifs définis pour l'air intérieur. La norme insiste sur la nécessité de filtrer PM et polluants chimiques également sur l'air recyclé en local. Les unités terminales de confort doivent donc être prises en compte dans la chaîne de filtration « système ». Le dimensionnement du débit d'air de ventilation doit être fonction à la fois de l'occupation humaine ET des polluants présents.

• **La certification environnementale WELL**

La cible A08 préconise la mesure en continu avec une approche qualitative des capteurs utilisés. Il est demandé le monitoring de trois polluants parmi une liste prédéfinie de 8 paramètres. Les capteurs devront être recalibrés ou remplacés annuellement avec un document certifiant cette opération.

La conception et le pilotage du système CVC

Deux stratégies se dessinent pour traiter la QAI :

- Le principe de dilution qui consiste à accroître le débit d'air extérieur pour évacuer les polluants des bâtiments.
- L'épuration en CTA et localement en unités terminales.

Sur les plans particulaire et moléculaire les filtres en CTA ne peuvent empêcher le transfert d'une partie des polluants extérieurs. En outre, à ce jour peu de CTA sont équipées de filtres chimiques.

La méthode par dilution pose deux problèmes : accroissement du transfert de polluants externes et augmentation de la consommation énergétique. Un accroissement du débit de 20% d'une CTA produit 50% d'augmentation de la consommation énergétique des ventilateurs, avec nécessité permanente de vaincre la résistance aéroulque des réseaux. A l'opposé, on peut limiter les pertes de charge des filtres en unités terminales en utilisant un media en fibres synthétiques, moins résistif, et en augmentant la surface de filtration grâce au plissage du media. Le niveau de filtration doit être déterminé pour obtenir une efficacité optimale en abattement (recyclage). De même des filtres moléculaires peuvent être conçus avec une faible perte de charge générée, tout en étant parfaitement efficaces en recyclage. L'efficacité d'un système d'épuration doit être mesurée en fonctionnement réel de recyclage et non pas grâce à un test simple d'efficacité sur une passe. Les systèmes d'épuration sont correctement qualifiés par l'indication du Clean Air Delivery Rate (débit d'air traversant le système d'épuration pondéré par le niveau de filtration) ainsi que par la cinétique de décontamination, mesurée en utilisation réelle. Ceci est va-

lable pour les unités terminales de l'installation CVC comme pour les épurateurs mobiles.

Les principes de base d'une bonne conception aéroulque sont en synthèse :

- Filtration particulaire et moléculaire de l'air extérieur en CTA.
- Epuration particulaire et moléculaire de l'air intérieur par les unités terminales.
- Optimisation du pilotage de l'installation de CVC de manière intelligente en intégrant l'ensemble des données de qualité d'air intérieur et extérieur.

Quels polluants monitorer à l'extérieur ?

La figure 1 montre une bonne corrélation entre les mesures de NO₂ et de PM_{2,5} de l'air extérieur d'un environnement urbain (bâtiment scolaire). La concentration en PM_{2,5} est un bon indicateur des pollutions extérieures issues entre autres du trafic routier, c'est donc le paramètre principal à monitorer. Le NO₂ intervenant en complément permettant d'affiner les analyses.

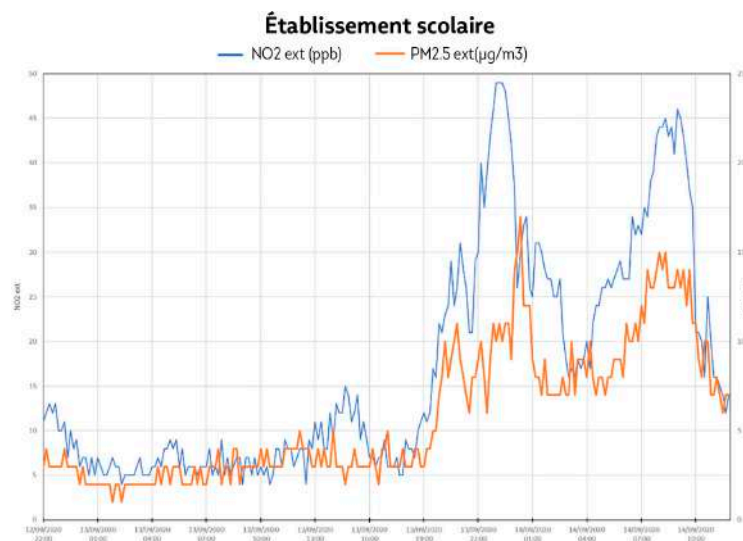


Figure 1 : comparaison courbes de concentration NO₂ et PM_{2,5} à l'extérieur

La figure 2 montre une corrélation entre les PM_{2,5} extérieurs et intérieurs. On peut également constater que l'occupation, illustrée par la courbe de CO₂, influe peu sur l'évolution en PM_{2,5}. Ceci montre que les particules les plus fines sont plutôt d'origine extérieure. Ceci avait bien été montré dans une étude CETIAT citée en référence. La règle à retenir est donc de monitorer les PM_{1-2,5-10} à l'intérieur ET à l'extérieur.

La figure 3 montre la corrélation logique entre la concentration du NO₂ à l'extérieur et l'intérieur mettant en lumière le transfert de pollution qu'il est nécessaire de limiter.

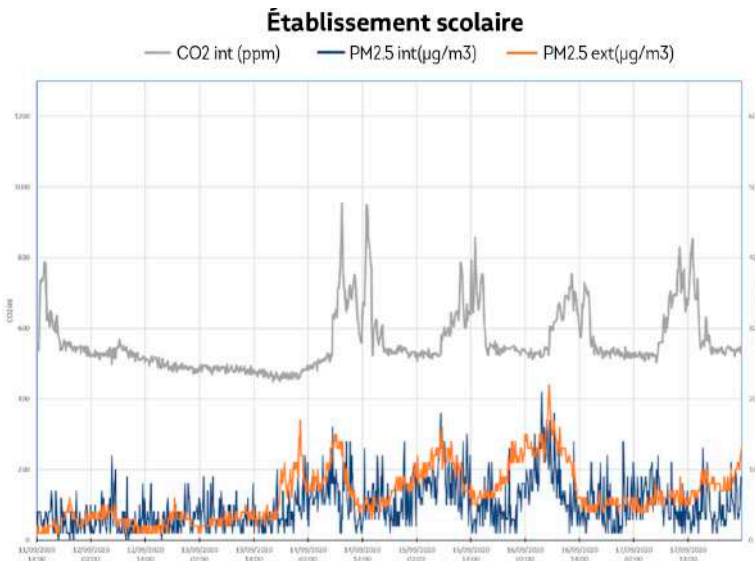


Figure 2 : Corrélation PM_{2,5} extérieur et intérieur & CO₂ intérieur

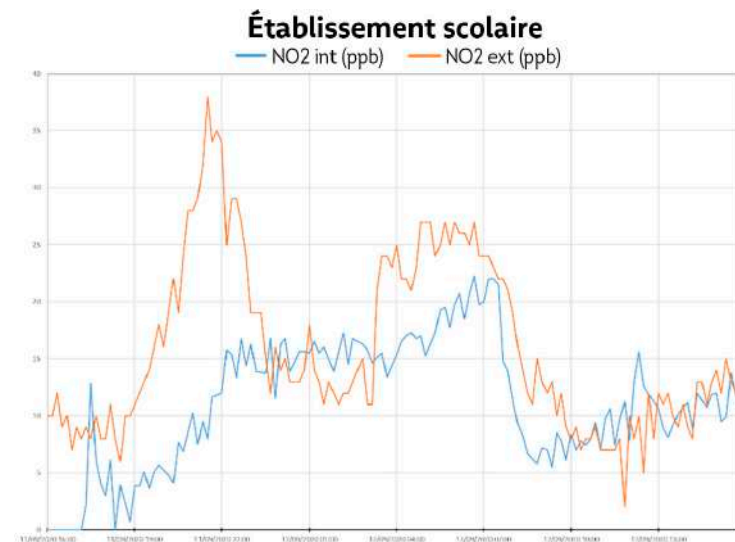


Figure 3 : Comparaison mesures NO₂ extérieur et intérieur

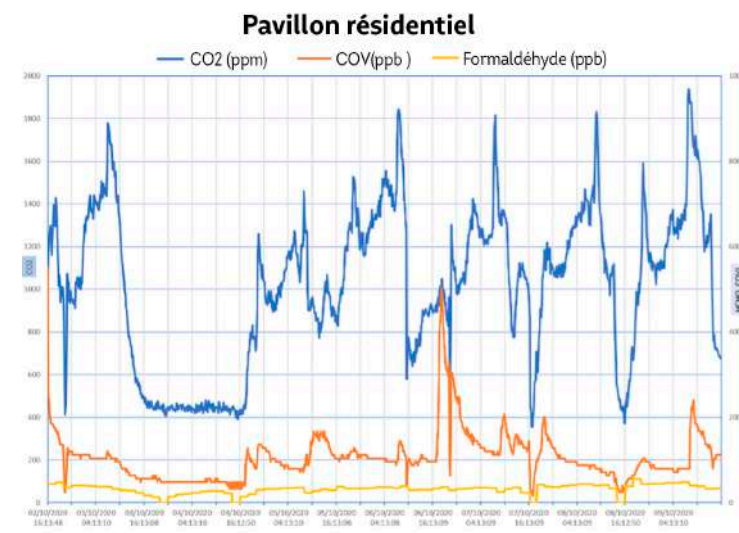


Figure 4 : Pavillon résidentiel - Formaldéhyde, COVL, CO₂

Quels polluants monitorer à l'intérieur ?

Au-delà des PM et du CO₂, la figure 4 montre la nécessité de monitorer le formaldéhyde indépendamment du COVL (dont il fait partie). Les pics importants de COVL peuvent par exemple simplement être dus à l'utilisation de gel hydroalcoolique, et ne correspondent pas à une réelle exposition toxique.

Un complément de monitoring des COVT (composés organiques sur tout le spectre) est utile et permet une conformité au référentiel WELL (stations PM_{2,5}, CO₂, COVT + Formaldéhyde sur certaines stations ciblées).

Le traitement des données

Ces données devront être traitées en continu par une algorithmie intelligente qui sera à la fois capable, de simuler la QAI de l'ensemble des locaux, de hiérarchiser les données et de faire de la prédiction afin de communiquer au système CVC des consignes de fonctionnement précises pour chacun des composants le constituant.

Mais il ne faut pas oublier que l'expertise humaine reste fondamentale, l'analyse de la qualité d'air étant souvent liée à de l'interprétation qui ne peut pas uniquement être mise en équation, surtout en phase de diagnostic.

Conclusion

Pour atteindre une bonne QAI, il est nécessaire d'effectuer en synergie une filtration/épuration sur la CTA d'air neuf et les appareils terminaux, qu'il faut piloter, sur des critères de QAI globaux, mesurés en continu, analysés et hiérarchisés. Ce processus doit être porté par un enrichissement des données acquises par des algorithmes. C'est cette approche système qui permet de répondre au mieux aux polluants ciblés par les normes, réglementations et certifications environnementales, et d'offrir aux occupants la meilleure qualité sanitaire de l'air auquel ils sont exposés.

Références

- Mise à jour de valeurs guides de qualité d'air intérieur / Le formaldéhyde
Avis de l'ANSES - Rapport d'expertise collective / février 2018
- Mise à jour de valeurs guides de qualité d'air intérieur / Le dioxyde d'azote
Avis de l'ANSES - Rapport d'expertise collective / février 2018
- Particules de l'air ambiant extérieur / Effets



sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie / Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France.

Avis de l'ANSES – Rapport de synthèse et de recommandations de l'expertise collective / juillet 2019

• Valeurs guides de qualité d'air intérieur.

Edition scientifique • Air et agents chimiques • janvier 2010 / Particules

Avis de l'AFSSET. Rapport d'expertise collective

• Développement-durable.gouv.fr / fiches thématiques / La pollution de l'air par les oxydes d'azote

• « Qualité d'air et développement durable. Comment intégrer au mieux la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments responsables ? » F.ROZMIAREK
Revue Techniques Hospitalières n°783 juillet-août 2020
Livre des actes des 60^{èmes} journées d'études et de formation IHF 2020

• « Influence de la filtration de l'air sur les concentrations en particules à l'intérieur d'une école équipée d'un système de ventilation double-flux » – rapport CETIAT NT 2014/037

Fabrice Rozmiarek

Responsable développement marchés Ethera

→ AUDIT TECHNIQUE ▶ TRAITEMENT D'AIR

Mesures de la QAI et audit CVC : un savoir-faire de spécialistes, un bénéfice pour tous

→ Une démarche combinant des mesures de la qualité de l'air à un audit du fonctionnement des installations de CVC permet de faire un état des lieux dans le bâtiment, de définir un plan d'action d'amélioration, puis de chiffrer le montant des travaux. Elle doit permettre d'augmenter la productivité des salariés et de contribuer à la diminution du taux d'absentéisme. Cet article illustre l'approche réalisée sur des bureaux suite à une prise à bail récente.

Enjeux

La qualité de l'air intérieur (QAI) à un rôle critique dans le bien-être et la santé des salariés. En moyenne, les capacités cognitives sont 60 % plus importantes dans un bâtiment Green Building [1] qui prend en compte la QAI que dans un bâtiment conventionnel. D'après une étude américaine publiée dans le Environmental Research and Public Health Journal [2], l'investissement de \$40 par personne et par an en faveur de la qualité de l'air est équivalent à une augmentation de la productivité de 8 à 10 % équivalent à plus de \$6000 de gain de productivité.

En France, on estime qu'environ 70 % des espaces de bureaux français disposent de solutions de traitement de l'air non conformes à la réglementation Code du Travail : débits insuffisants, gaines d'air neuf non raccordées, etc.). Dans la majorité des cas, l'agencement des bâtiments a été modifié en termes de cloisons ou d'affectations, mais le système de ventilation n'a pas été réagencé. Aussi réaliser un audit des installations CVC concomitamment aux mesures de la qualité de l'air intérieur constitue un levier pour les entreprises

afin de garantir le bien-être et la santé des salariés.

Une telle démarche a été expérimentée par PHOSPHORIS suite à son emménagement récent dans un immeuble tertiaire de 1993 à Charenton (94). L'un des plateaux de bureaux de 200 m² situé au dernier étage, a fait l'objet des analyses suivantes :

l'identification des sources de pollution autour du site,

des mesures de l'air intérieur en période normale d'occupation,

un audit technique des installations de traitement d'air,

l'établissement d'un plan d'action d'amélioration.

Les sources extérieures

Les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) comme AIRPARIF [3] établissent des bilans annuels de la concentration des polluants surveillés réglementairement ainsi que des cartes interactives. Il est donc généralement possible de dresser un inventaire des principales sources extérieures de pollution à proximité du site étudié

»»»

dans un rayon d'un kilomètre environ (trafic routier, pollution industrielle, pollution agricole...).

Pour le site, un bilan annuel de la qualité de l'air extérieur a été établi en estimant le nombre de jours où la moyenne journalière en particules dépasse les valeurs réglementaires et les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote. Sur l'année 2019, il a été enregistré 45 jours de dépassement de la concentration en particules PM_{10} à proximité des bureaux situés le long de l'autoroute A4, la réglementation limite à 35 jours de dépassement annuel sous peine de sanction (voir Figure 1). La concentration en dioxyde d'azote moyenne est de $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une valeur limite à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

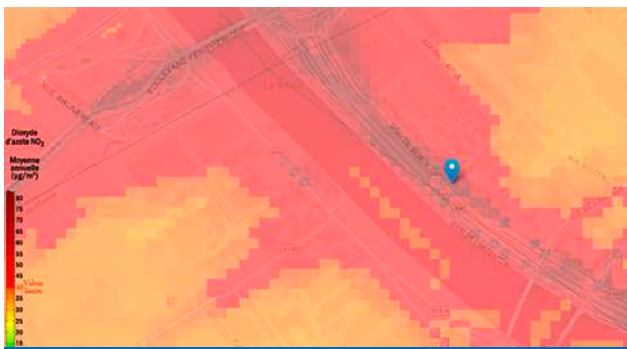


Figure 1 : Concentration moyenne annuelle en NO_2 à l'emplacement des bureaux étudiés [Source : AIRPARIF]

Mesures de l'air intérieur

Les mesures de l'air intérieur ont été faites avec des capteurs mesurant les paramètres suivants :

- la température et l'humidité relative,
- les composés organiques volatils totaux,
- le dioxyde de carbone,
- les particules (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1).

La durée de la période de mesures est d'au moins quinze jours, sur une période d'occupation « normale » des bureaux (i.e. peu de télétravail). A partir des données enregistrées sur une base de temps très courte, ont été calculées des moyennes horaires sur les jours de la semaine (bureaux occupés), le week-end (bureaux inoccupés) et pour certains paramètres mesurés jour par jour. L'ingénieur qualité de l'air a analysé les données : comparaison, identification des tendances en termes de dynamique chimique, vérification aux regards de valeur de référence en fonction de l'incertitude des capteurs.

La figure 2 présente les variations horaires de la concentration en dioxyde de carbone pour les trois points de mesures effectués durant la période d'audit. La concentration en dioxyde de carbone est importante car supérieure à une concentration de 1000 ppm (partie par million) dès le matin (8h30) jusqu'à la fin de la journée (18h). La valeur de 1000 ppm est une valeur de référence à partir de laquelle les premiers symptômes de confinement peuvent arriver (maux de tête, problème de concentration, fatigue, etc.)

Les concentrations des particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont inférieures aux valeurs de références, cependant les variations de la concentration pour les trois points correspondent aux pics d'activités et au trafic routier (voir Figure 3)). Les particules

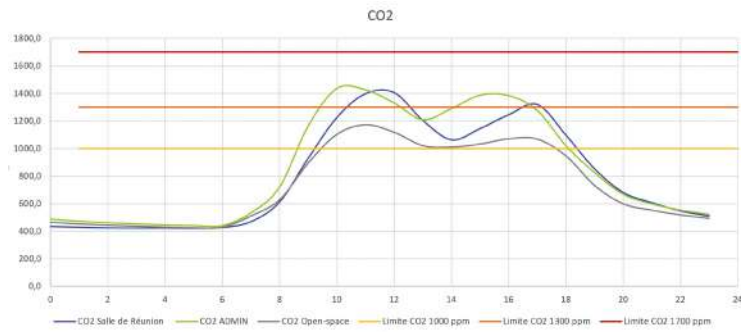


Figure 2 : Mesure de concentration en CO_2 dans les bureaux

PM_{10} peuvent être transférés de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment. Les bureaux étudiés disposent d'un revêtement de sol en moquette qui, sous l'effet d'abrasion avec les déplacements, peut également être une source d'émission de particules. La ventilation, si elle est mal entretenue, peut être à l'origine de la dispersion de particules dans l'air et la diffusion de micro-organismes (virus, bactéries, allergènes...).

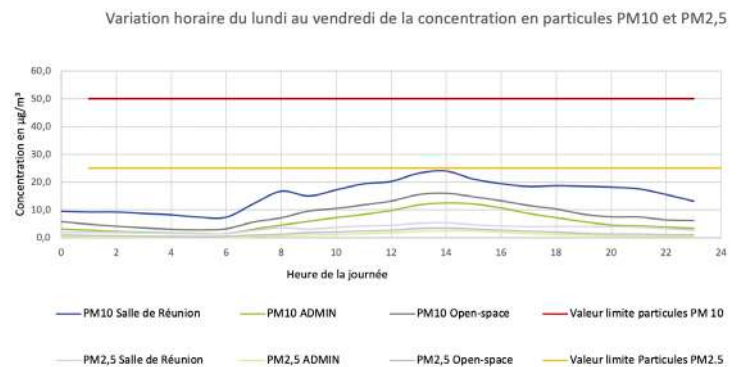


Figure 3 : Mesure de concentration en PM dans les bureaux

Le niveau de fond de la concentration en COV est compris entre 5000 et $7000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les capteurs ont une incertitude d'environ 20 %. Ils permettent de donner une tendance et d'identifier un désordre. Ici, la concentration augmente très rapidement dès l'occupation des locaux (8h) et redescend doucement après la fermeture des bureaux (voir Figure 4). Le renouvellement de l'air ne permet pas d'évacuer correctement les composés organiques volatils émis en semaine par les activités et les occupants. Les variations journalières sont étudiées ici pour regarder l'influence humaine sur la pollution de l'air.

Pour caractériser et quantifier plus précisément les Composés organiques volatils, il est préférable de réaliser des prélèvements par accumulation, puis analyse en laboratoire (Chromatographie en phase gazeuse ou HPLC).

L'audit technique des installations de traitement d'air

L'audit technique CVC est établi sur un constat visuel des installations de traitement d'air, des mesures des débits d'apport d'air neuf et la comparaison des débits aux dispositions des articles R 4222-3 et R4222-4 du Code du travail. Le débit minimal d'air neuf à introduire par occupant est fixé pour des bureaux ou des locaux sans travail physique à $25 \text{ m}^3/\text{heure}$ et par occupant. Les installations des bureaux audités sont prévues pour être en double flux : apport d'air neuf dans les zones de bureaux et aspi-

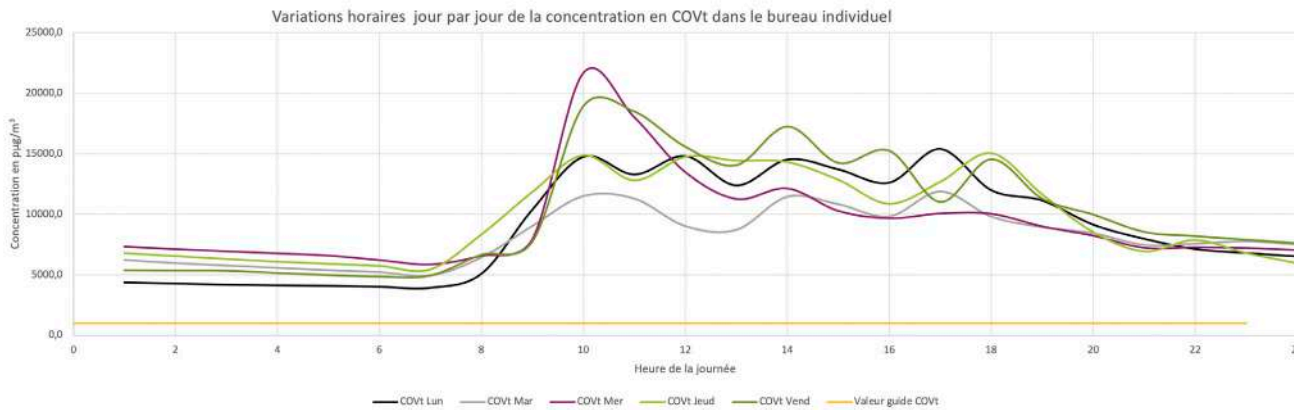


Figure 4 : Mesure de concentration en COV dans les bureaux

ration dans les sanitaires. Une aspiration a également été identifiée dans la zone de circulation centrale. Des ventilo-convecteurs gèrent le confort thermique : chaud l'hiver et froid l'été. L'audit technique a montré que les gaines d'apport d'air neuf n'étaient pas raccordées aux ventilo-convecteurs, l'air neuf était soufflé dans le faux-plafond. Les débits mesurés sont conformes au débit réglementaire selon le Code du travail ; cependant l'apport d'air neuf n'est pas maîtrisé et les ventilo-convecteurs peuvent être sources de pollution car les filtres sont très encrassés. Réalisé antérieurement à la prise à bail, on constate que le cloisonnement effectué a isolé un bureau du système de ventilation car il ne dispose ni de ventilo-convecteur ni de gaine d'air neuf dans le faux plafond (voir Figure 5).



Figure 5 : Ventilo-convecteur non raccordé en faux-plafond

Analyses

- L'air apporté est soufflé dans le faux-plafond, il n'est pas diffusé correctement au sein des espaces de travail. Cela explique les niveaux de CO₂ dans les bureaux durant les heures d'occupation (<1000 ppm).
- La gaine d'extraction de l'air n'est pas raccordée, l'air est extrait dans le faux-plafond technique. Il n'y a pas d'évacuation correcte des polluants (Concentration élevée en COV durant l'occupation).
- Les filtres encrassés des ventilo-convecteurs peuvent être à l'origine d'une pollution de l'air et peuvent favoriser le développement et la diffusion dans l'air de micro-organismes (risque d'irritation, maux de tête, allergies, maladie).

Plan de travaux

Les solutions d'améliorations ne sont parfois pas très compliquées à mettre en place et peuvent apporter beaucoup

pour le confort et la santé des salariés.

- Mettre en place des grilles d'air neuf en faux-plafond et raccorder les gaines d'air neuf.
- Tirer une gaine d'air neuf dans les zones non ventilées (bureau isolé).
- Changer tous les filtres des ventilo-convecteurs pour mettre des filtres ISOFIL afin de préserver les ventilo-convecteurs et la qualité de l'air. Mettre des filtres de type F5 ou F6 pour filtrer les particules et les changer à minima tous les ans.
- Filtres de la centrale de traitement d'air : mettre des filtres à particules type G4 et F7, si possible envisager de mettre un filtre à charbon actif pour traiter les gaz extérieurs. Prévoir un encrassement important du préfiltre au vu de la pollution de l'air extérieur. Changer le filtre G4 tous les 2 mois. Ce rythme sera à ajuster en fonction du niveau d'encrassement. Mettre en place un planning de maintenance du système de traitement de l'air et de changement des filtres.

Le budget dépend des travaux à réaliser mais peut-être tout à fait raisonnable au regard des bénéfices sur le confort, le bien-être et la productivité des salariés. Par exemple, pour cet espace de bureau de 200 m² dans un immeuble des années 90 occupé par une vingtaine de salariés, le montant des travaux d'amélioration de la qualité de l'air est compris autour de 15 €/m². Il est vraisemblable que la partie la plus difficile pour la réalisation des travaux est l'obtention de l'accord du gestionnaire et du propriétaire du local loué.

Conclusion

Les problématiques de qualité de l'air sont souvent perçues comme anxiogènes car non perceptibles à l'œil nu et pas aisément compréhensibles. Réalisée par des spécialistes, la campagne de mesures combinée à l'audit des installations CVC fournit des éléments en vue d'une communication vers les salariés. Cette démarche est généralement perçue très positivement par les salariés d'une entreprise, qui apprécient que l'on se soucie de l'environnement de travail.

RÉFÉRENCES

- [1] <https://dash.harvard.edu/handle/1/27662232>
- [2] <https://www.mdpi.com/1660-4601/12/11/14709/htm>
- [3] <https://www.airparif.asso.fr/accueil-airparif>

Julie Couteau,
Ingénieur Chimiste de la qualité
de l'air BET PHOSPHORIS