

# Qualité et traitement de l'air intérieur

Cécile HORT, Vincent PLATEL, Michel ONDARTS,  
Sabine SOCHARD, Anne REGUER,  
Laurent MOYNAULT\*

**Résumé :** Dans les pays occidentaux, nous passons entre 70% et 90% de notre temps dans des espaces confinés (habitat, moyens de transports, etc.). La qualité de l'air que nous y respirons est en général très inférieure à celle de l'air extérieur. Notre mode de vie et l'utilisation croissante de nouveaux produits et matériaux créent des cocktails de substances chimiques qui peuvent être à l'origine de l'augmentation préoccupante de pathologies telles que l'asthme, les allergies ou encore les cancers. Ces

polluants sont aussi présents dans l'air. L'augmentation préoccupante des problèmes de santé publique incite à mettre au point des dispositifs de traitement de l'air intérieur. Vu la multitude de polluants aux propriétés physico-chimiques très différentes, l'équipe tarbaise du Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP) étudie le couplage de procédés, tel que la biofiltration couplée à l'adsorption.

**Mots clés :** air intérieur, qualité de l'air, COV, biofiltration

\*\*\*

## *Quality and Indoor Air treatment*

**Abstract:** In developed countries, between 70% and 90% of the life time are spent in confined spaces

(housing, transport, etc.). Air quality in these closed spaces is generally inferior than outside. Our lifestyles

---

\* Enseignants-chercheurs, membres de l'équipe « Traitement des Effluents Gazeux » - site de Tarbes, Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (LaTEP) de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, cecile.hort@univ-pau.fr.

and the growing use of new products and materials create cocktails of chemicals compounds (COV, CIV...) that can cause an increase of worrying diseases such as asthma, allergies or even cancer. These pollutants are particularly present in indoor air. These increasing public health problems gives rise to the development of devices for the treatment of indoor air. However,

indoor air contains a lot of chemical substances showing very different physicochemical properties. The “Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés” (LaTEP) studies the coupling of treatment processes, such as biofiltration coupled to adsorption.

**Key-words:** indoor air, air quality, COV, biofiltration

\*\*\*

## Introduction

Chaque jour, environ 11000 litres d'air transitent vers les 70 m<sup>2</sup> de surface d'échange qui constituent notre appareil respiratoire. Cela correspond à une consommation moyenne journalière de 14 kg d'air pour un adulte<sup>1</sup>. Quelle est la qualité de l'air que nous respirons ?

Aujourd'hui, de nombreuses activités anthropiques engendrent, dans l'environnement et les atmosphères intérieures, des rejets de substances<sup>2</sup> polluantes tels que les composés volatils (organiques (COV) ou inorganiques (CIV),...), dont les effets plus ou moins délétères provoquent des problèmes d'odeurs et/ou de toxicité qui peuvent être à l'origine de l'augmentation préoccupante de problèmes de santé publique (allergies, asthme, cancers...). La plupart de ces polluants atmosphériques, même à de très faibles concentrations, ont des effets sur les écosystèmes et sur l'homme.

Les bâtiments ou les habitacles ne sont pas des remparts inviolables contre cette pollution ; bien au contraire, les matériaux qui les constituent, leur occupation, les activités dont ils sont le lieu sont intrinsèquement des sources de très nombreux polluants. De la même manière qu'il existe des risques sanitaires liés au rejets gazeux industriels, ceux liés à l'atmosphère et aux ambiances intérieures sont de plus en plus pris en compte.

---

<sup>1</sup> Pour 1,5 kg de nourriture et 2 kg d'eau ingérés par jour.

<sup>2</sup> Elément chimique à l'état naturel ou obtenu par tout procédé de production.

Dans les pays occidentaux, nous passons de 70 à 90% de notre temps dans des espaces confinés (logements, lieux de travail, écoles, transports...) et notre exposition à l'air est de 100%. Au début des années 1980, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a attiré l'attention des dirigeants politiques, mais aussi du grand public, sur les effets sanitaires qu'entraînait une qualité d'air intérieur dégradée. Pour l'OMS en 2006, 24 % des maladies sont causées par des expositions environnementales qui peuvent être évitées. Un tiers de ces maladies touche des enfants de moins de cinq ans.

Depuis une vingtaine d'années, dans les pays industrialisés, on assiste à une préoccupante augmentation de la prévalence des allergies et de l'asthme ; en France, ces affections touchent 10 à 12% des enfants, 2 fois plus qu'il y a 20 ans. Les cancers, qui constituent avec les maladies cardio-vasculaires 60% des causes de décès, augmentent aussi, notamment chez les enfants (+1% par an) et adolescents (+1,5% par an) ; le nombre de nouveaux cas, en France par exemple, a augmenté de 63% ces vingt dernières années, ce qui correspond à une augmentation de 36% si l'on tient compte de l'augmentation de la population et de son vieillissement (données CIRC). Cette progression peut être imputée à l'effet de substances cancérigènes (COVs, goudrons, amiante, diverses particules fines, champignons microscopiques...). L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) a estimé entre 300 millions et 1,3 milliard d'euros les coûts que représentent pour l'assurance maladie certaines pathologies liées à la pollution : entre 200 et 800 millions d'euros pour le coût du traitement de l'asthme imputable à la pollution atmosphérique (10 à 35% des cas) et de 100 à 500 millions d'euros pour le coût de la prise en charge des soins du cancer attribuable à l'environnement (de 1 à 5% des cas) (Avignon, 2007).

On observe aussi une augmentation des maladies auto-immunes (sclérose en plaque...), de l'obésité, des difficultés à procréer, manifestations qui peuvent s'expliquer par des désordres hormonaux causés par des perturbateurs endocriniens, catégorie qui rassemble des substances très diverses entrant dans la composition de détergents, de plastifiants, de solvants ou de produits phytosanitaires<sup>3</sup>, et qui constituent des "cocktails" difficiles à maîtriser (Benoit-Browaeys, 2007). L'industrie chimique n'a pas freiné sa croissance : on produit chaque année dans le monde 400 millions de tonnes de produits chimiques contre 1 million en 1930. Le nombre de produits contenant des substances dangereuses pour la santé humaine est bien plus important que le nombre de substances elles-mêmes. Il est de plus fréquent que l'appellation de produits change tous les deux à trois ans pour des raisons commerciales sans que sa composition soit réellement différente pour autant. Inversement, un produit à la toxicité reconnue peut changer de composition sans changer de nom commercial. Le caractère mouvant de la composition des produits

---

<sup>3</sup> Nommés « pesticides » en anglais.

comme le caractère évolutif de leurs appellations rendent difficile l'établissement d'une nomenclature toxicologique (Blandin, 2008).

Ces molécules toxiques sont classées en fonction du niveau de preuve de leur effet cancérogène sur l'homme ou sur l'animal . Il existe trois classifications principales : celle du CIRC (classification internationale en 4 groupes), celle de l'Union Européenne et celle de l'EPA, l'agence de l'environnement américaine. De ces classements découlent des obligations d'étiquetage.

### **Qualité de l'air intérieur**

La qualité de l'air intérieur se distingue de celle de l'air extérieur par des concentrations le plus souvent très nettement supérieures et par la présence de substances non détectées à l'extérieur.

Les sources et vecteurs des pollutions observées sont nombreuses et variées : produits de construction, de décoration, d'ameublement, d'entretien, de bricolage, d'équipements, de chauffage et de production d'eau chaude, ventilation, présence humaine et ses activités associées liées aux besoins essentiels (cuisine, hygiène, lavage...) ou autres (tabagismes, utilisation d'encens, de bougies...), présence de plantes, d'animaux, proximité d'entreprises, de routes... Néanmoins, la qualité de l'air intérieur reste encore mal connue malgré l'augmentation du nombre de campagnes d'analyses d'environnements intérieurs (habitats, lieux publics divers). L'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) relate en 2001 les faibles connaissances sur les pollutions intérieures dans les habitats français (Mosqueron et *al.*, 2001). Ce constat est d'ailleurs similaire au niveau mondial (Johnston et *al.*, 2002), malgré un nombre de campagnes d'analyses plus élevé dans certain pays (GerS I (German Environmental Survey) par exemple, étude allemande débutée en 1984). Il faut ajouter à ce constat le faible niveau de connaissances sur les répercussions sanitaires inhérentes à la pollution de l'air intérieur (Johnston et *al.*, 2002).

L'air intérieur est cependant devenu une nouvelle priorité sanitaire (Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2003 et 2004), Plan National Santé Environnement (AFSSE, 2004)). De ce fait et grâce à l'augmentation des modes de prélèvements et d'analyses, les études qualitatives et quantitatives se multiplient (Mosqueron et *al.*, 2001) lors de campagnes de grandes ampleurs aux échelles nationales (campagne de mesure de l'OQAI, Sentinelles de l'air, Atmos'air ) ou européenne (Expolis).

### Les différents types de pollution

Différentes pollutions intérieures peuvent être rencontrées, parmi lesquelles on peut citer :

- les pollutions chimiques (cf. Tableau 1) : les plus représentatives d'un point de vue qualitatif de la pollution intérieure, elles sont constituées en grande majorité des composés organiques volatils (COVs), dont la définition est complexe<sup>4</sup>. Ces composés se trouvent à l'état de gaz ou de vapeur dans les conditions normales de température et de pression. En 1989 une classification selon le point d'ébullition de ces COVs a été réalisée par l'OMS. Ce classement intègre dans les composés très volatils (Very Volatil Organic Compounds (VVOC)) le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (cf. Tableau 1 adapté de Ayoko, 2004, p. 91).

| Abréviation | Description                       | Point d'ébullition (C) | Exemples  |
|-------------|-----------------------------------|------------------------|---|
| VVOC        | Composés organiques très volatils | < 0 à 50 – 100         | CO, CO <sub>2</sub> , HCHO                                    |
| VOC         | Composés organiques volatils      | 50-100 à 240-260       | Solvants (aliphatiques aromatiques), terpènes                 |
| SVOC        | Composés organiques semi-volatils | 240-260 à 380-400      | Biocides (chlorpyrifos, lindane...), plastifiants (phtalates) |
| POM         | Matière organique particulaire    | >380                   | Biocides (pyrethroids), HAP                                   |

Tableau 3 : Classement des COVs dans l'air intérieur (adapté de Ayoko, 2004).

Bien d'autres substances chimiques doivent être ajoutées à tous ces COVs :

- les Composés Inorganiques Volatils (CIV), par exemple l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), ainsi que le radon (gaz inerte radioactif), les éléments traces métalliques (métaux, métalloïdes), les composés organo-métalliques.
- les pollutions dites particulières : particules inertes (PM10<sup>5</sup>, PM2,5<sup>6</sup> (particules fines), PM1<sup>7</sup> (ultra fines)), amiante, fibres minérales artificielles ;

<sup>4</sup> D'après l'arrêté ministériel du 1<sup>er</sup> mars 1993, les COVs sont définis comme des substances organiques (à l'exclusion du méthane) contenant du carbone et de l'hydrogène auquel se substituent partiellement ou totalement d'autres atomes comme les halogènes, l'oxygène, le soufre, l'azote ou le phosphore, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates. La Directive européenne n°13 du 11 mars 1999 complète cette définition en ajoutant qu'il s'agit de tout composé organique ayant à la température ambiante (293,15 K) une pression de vapeur supérieure à 10 Pa.

<sup>5</sup> PM10 : Particules de diamètre inférieur à 10 µm.

- les pollutions biologiques : bactéries, moisissures, allergènes d'animaux (acariens, chats, chiens) ;
- les pollutions physiques : champs électrostatiques très basses fréquences, bruits.

Certains de ces polluants sont faiblement biodégradables ; on parle alors de persistance dans le milieu et donc de Polluants Organiques Persistants (POP) (retardateurs de flamme, produits phytosanitaires). D'autres substances, comme les métaux, possèdent la capacité de s'accumuler dans les tissus vivants (phénomène de bio-accumulation) et/ou de perturber nos hormones (perturbateurs endocriniens). La multitude de ces polluants, de propriétés physico-chimique très différentes, et leur présence en faible quantité dans les ambiances confinées, pose un problème vis-à-vis du traitement à mettre en œuvre pour leur élimination.

### ***La composition de l'air intérieur***

Un grand nombre de familles chimiques et de substances constituent la pollution de l'air intérieur. A titre d'exemple, la figure 1 résulte d'une analyse par chromatographie gazeuse de l'air intérieur d'une pièce d'habitation. Cette figure met en évidence la présence d'une vingtaine de COVs plus ou moins nocifs pour la santé humaine. L'étude Expolis recense plus de 250 COVs différents dans l'ensemble des habitats évalués (Mosqueron et *al.*, 2004b). Lors de l'étude NHEXAS (National Human Exposure Assessment Survey), 150 à 200 composés ont été systématiquement détectés dans les ambiances intérieures (Mosqueron et *al.*, 2004b).

Ces composés sont généralement à des concentrations faibles, de l'ordre du  $\mu\text{g m}^3$ . La concentration globale est donc environ de quelques centaines de  $\mu\text{g m}^3$  (la valeur médiane en COVs totaux dans l'étude GerS I est de  $330 \mu\text{g m}^3$  [Mosqueron et *al.*, 2004b]). Ces concentrations sont, pour la quasi totalité des constituants et des cas décrits dans la littérature, plus élevées à l'intérieur de l'habitat qu'à l'extérieur. Le ratio entre concentrations intérieures et extérieures varie entre 2 et 50 pour les études réalisées en France jusqu'en 2001 (Mosqueron et *al.*, 2004a), ce qui implique l'existence de nombreuses sources intérieures de polluants. La présence de ces sources a été confirmé par la récente étude de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (Kirchner, 2007), qui s'est intéressée à la détection de 20 COVs-dans 567 résidences principales françaises.

Cette étude (cf. figure 2, adaptée de Kirchner) montre une nouvelle fois la spécificité de l'air intérieur, le pourcentage de logements français ayant des teneurs

---

<sup>6</sup> PM<sub>2,5</sub> : Particules de diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ .

<sup>7</sup> PM<sub>1</sub> : Particules de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .

en COVs plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur, variant entre 68,4% pour le trichloroéthylène (irritant, cancérigène, mutagène) et 100% pour le formaldéhyde (cancérigène) ou l'hexaldéhyde.

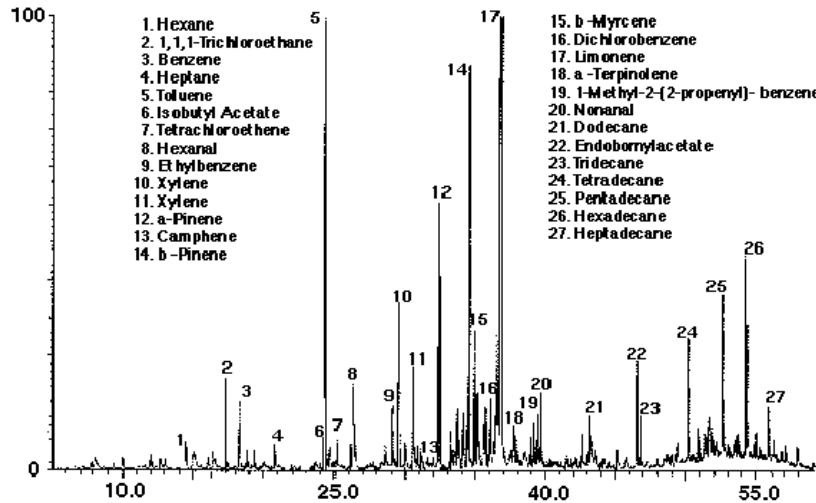


Figure 1 : Exemple de chromatogramme d'un air intérieur.

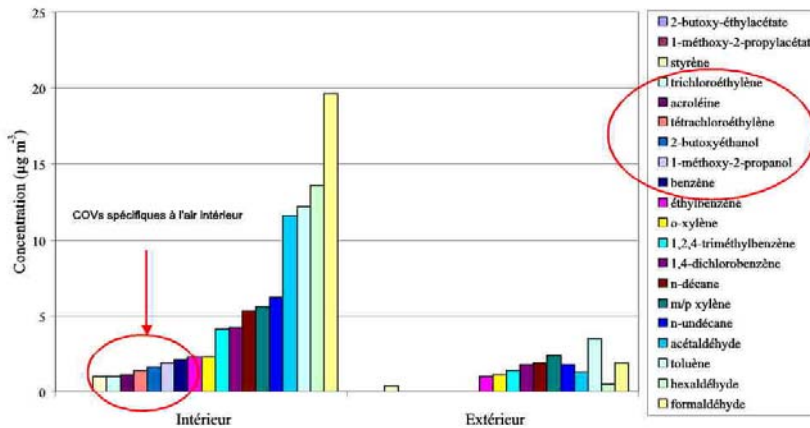


Figure 2 : Spécificité de l'air intérieur : mesure de 20 COVs dans 567 résidences françaises (adapté de Kirchner, 2007)

Les résultats obtenus mettent également en évidence la présence de COVs spécifiques à l'air intérieur, tels que le benzène (classé cancérigène) et le trichloroéthylène (mutagène). On a également constaté que la présence de garages attenants et communiquant avec les logements augmentait les valeurs médianes de concentration de plusieurs COVs.

La composition des pollutions intérieures entre divers pays est hétérogène, ce qui provient de l'utilisation de matériaux de construction, de produits d'entretien et de type de ventilation différents (Jones, 1999).

Une étude réalisée par Sakai et al. (Sakai et al., 2004) sur la pollution de l'air dans une ville japonaise et une ville suédoise a par exemple montré que les concentrations en formaldéhyde sont plus fortes au Japon qu'en Suède (respectivement 73 contre 11  $\mu\text{g m}^3$ ). Ces différences sont attribuées à :

- l'influence de l'âge des bâtiments ;
- l'utilisation de matériaux autre que le bois dans la majorité des logements japonais ;
- la proximité d'industries pour la ville japonaise;
- la limitation, depuis les années 70, de l'utilisation du formaldéhyde dans la production des matériaux de construction en Suède.

Cette tendance est confirmée pour la famille chimique des composés aromatiques entre un autre pays asiatique (Singapour) et diverses villes européennes (Zuraimi et al., 2006).

La concentration du  $\text{NO}_2$  est également plus forte au Japon qu'en Suède, les causes principales étant attribuées à un moins bon entretien des chauffages et à l'utilisation de cuisinières à gaz au Japon alors qu'elles sont électriques en Suède.

Des différences comportementales peuvent également entraîner des hétérogénéités entre pays : les concentrations en isoprène sont supérieures en Europe du fait d'un nombre de fumeurs plus élevés qu'à Singapour (Zuraimi et al., 2006). Les pesticides employés aux USA et en Australie (heptachlor, dieldrin, chlordane, aldrin et chlorpyros) sont différents de ceux utilisés en Allemagne (où l'aldrin, le chlordane, le dieldrin et l'heptachlor n'ont pas été détectés). Ces pesticides, rencontrés dans les ambiances intérieures, que l'on nomme dans ce cas biocides, varient aussi selon le climat et les facteurs culturels. Le DDT (pesticide employé pour tuer les moustiques) a ainsi été retrouvé dans les ambiances intérieures de maisons en Arizona, pays proche du Mexique où le DDT a été utilisé jusqu'en 1997, alors qu'il avait été banni depuis la fin des années 80 aux USA. Le même phénomène a été observé entre l'Allemagne de l'Est et de l'Ouest, où le DDT



avait été banni en 1972 alors qu'il a été utilisé jusqu'en 1989 pour la protection du bois en Allemagne de l'Est (Hylotox) (Ayoko *et al.*, 2004).

Récemment, le projet Expose portant sur l'évaluation de l'exposition d'enfants franciliens (étude sur 130 enfants âgés de 6 à 7 ans) aux pesticides dans l'environnement intérieur a montré qu'au moins un pesticide était présent dans 94% des foyers étudiés (Ginestet, 2007). Le lindane, présent dans l'air de 88% des logements, est le pesticide le plus fréquemment mesuré.

Enfin, le climat peut également participer à l'accroissement de ces différences en favorisant certains phénomènes physico-chimiques, comme le re-largage de COVs par les matériaux de construction, comme c'est le cas pour le linoléum en présence d'humidité et/ou de températures élevées (Zuraimi *et al.*, 2006).

### ***Les sources de pollution***

Les sources de pollution de l'air intérieur sont nombreuses. Poupard propose de les classer suivant leurs origines (Poupard *et al.*, 2005) :

- sources intérieures (endogènes) ;
- issues de réactions dans le milieu intérieur ;
- issues des transferts du milieu extérieur vers le milieu intérieur.

### ***Les sources endogènes***

On distingue deux types de sources endogènes : les sources permanentes et les sources ponctuelles (cf. tableau 2)

Les sources permanentes dominantes sont issues des matériaux de construction et d'isolation (Edwards *et al.*, 2001). Parmi elles, les aldéhydes (le formaldéhyde et l'acétaldéhyde plus particulièrement) font partie des composés majoritaires (flux d'émission des matériaux le plus élevé (Liu *et al.*, 2006)), ratio concentrations intérieur/extérieur maximum.

Les sources endogènes ponctuelles (cf. tableau 2) sont essentiellement dues à l'activité humaine. L'utilisation de produits ménagers (Edwards *et al.*, 2001), les différentes combustions présentes dans un foyer (cuisinière, chauffage) ainsi que les Fumées de Tabac Environnementales (FTE) (Ohura *et al.*, 2007) en sont les causes principales.

| Composés et familles     | Sources   |
|--------------------------|---|
| Formaldéhyde (formol)    | FTE, mousse isolante, panneau de particules, contre-plaqué, peinture à l'eau, produits ménagers, tissus |
| p-dichlorobenzène        | Antimites, désodorisants  |
| Chlorure de benzyle      | Isolation, textiles, désinfectants, plastiques, peintures   |
| Benzène                  | FTE, combustion, ameublement, produits de construction et de décoration, combustion d'encens            |
| Tétrachloroéthylène      | Nettoyage à sec, moquettes, tapis   |
| Chloroforme              | Eau chlorée   |
| 1,1,1-trichloroéthylène  | Nettoyeur à sec de vêtement, aérosol, peintures, colles, vernis, dégraissant pour métaux                |
| Tétrachlorure de carbone | Nettoyant industriel  |
| HAP                      | Peinture, adhésifs, pétrole, produit de combustion  |
| Terpènes                 | Désodorisant, FTE, tissus   |
| Cétones                  | Laques, adhésifs, vernis  |
| Ether                    | Résines, peintures, vernis, laque, colorants, produits cosmétiques                                      |
| Esther                   | Plastiques, résines, solvant pour laque, parfum   |

Tableau 4 : Exemples de sources endogènes de COVs dans les ambiances intérieures.

Enfin, le métabolisme humain est également source de pollution. Chaque personne dégage dans ces expirations environ 200 COVs dont les plus fréquents et connus sont l'isoprène (synthèse du cholestérol) et l'acétone (métabolisme du glucose) (Ruzsanyi et al., 2005, Phillips et al., 1999). Phillips et al. dénombrent, sur 50 personnes, un total de 3481 composés différents dont 27 communs à tous les sujets. Les sources de ces composés sont constituées à la fois du métabolisme endogène et des vapeurs et gaz auxquels les sujets sont exposés.

#### **Réactions dans le milieu confiné**

Les polluants peuvent également être issus de réactions à l'intérieur de l'habitat. Un exemple fréquent est la formation de formaldéhyde à la suite de la réaction entre l'ozone et un composé volatil insaturé (typiquement un alcène ou un terpène) (Liu et al., 2006, Ohura et al., 2007).

Les aldéhydes peuvent également être issus de réactions d'oxydation photochimique de COV (Zhang et al., 1994).

### ***Les sources extérieures***

Les pollutions extérieures sont essentiellement dues au trafic automobile, à l'industrie et aux réactions photochimiques. Le transfert de ces polluants a été mis en évidence par la comparaison entre les pollutions intérieures mesurées en zone rurale et celles mesurées en zone urbaine. Diverses études françaises mettent en évidence l'influence des concentrations extérieures en NO<sub>2</sub> sur les concentrations intérieures et donc sur l'influence du trafic automobile (Mosqueron et *al.*, 2004a). Fisher et *al.* (Fisher et *al.*, 2000) observent des concentrations systématiquement supérieures, pour certains composés cibles (HAP, COVs, particules fines), dans les habitats proches de trafic dense.

Certains composés ont essentiellement une origine extérieure, la concentration intérieure étant attribuée au transfert extérieur/intérieur. La répartition entre sources intérieures et sources extérieures peut être très variable en fonction des constituants considérés, la part de chacune de ces sources pouvant varier, en fonction du constituant, de 10 à 90% (Liu et *al.*, 2006).

### ***Variations temporelles des concentrations***

Les concentrations en polluants peuvent présenter, à différentes échelles de temps, des variations plus ou moins fortes.

A l'échelle de la vie du bâtiment, en ce qui concerne les polluants issus des matériaux de construction, on observe des concentrations maximales les premiers mois après construction ou rénovation (phénomène typique pour les émissions d'aldéhydes (Mosqueron et *al.*, 2004b)).

La saison a également plusieurs influences sur les concentrations intérieures (Mosqueron et *al.*, 2004b, Ohura et *al.*, 2007) :

- les COVs sont plus concentrés en hiver du fait de l'isolement du bâtiment pour économiser l'énergie ;
- à l'inverse, les aldéhydes sont plus concentrés en été qu'en hiver : la température étant supérieure, le dégazage des matériaux de construction est plus intense.

Au cours d'une journée, les concentrations varient également en fonction de l'activité des personnes présentes (influence des sources ponctuelles). L'utilisation d'une cuisinière, les tâches ménagères, les activités de bricolage ou encore les fumées de tabac environnementales (FTE) sont autant de sources ponctuelles qui entraînent des variations plus ou moins significatives de la concentration en polluants.

Enfin, les variations de concentration peuvent être dues au type de ventilation et à la fréquence d'ouverture des fenêtres (Poupard et *al.*, 2005).

### **Les traitements de l'Air Intérieur**

Deux approches peuvent être distinguées pour diminuer la pollution de l'air intérieur :

- la suppression des sources intérieures de pollution par l'utilisation de matériaux, produits d'entretien alternatifs ne relarguant pas ou peu de polluants (substitution du formaldéhyde présent dans les colles par des colles au tanin (Kumar et *al.*, 2004, Bisanda et *al.*, 2003), développements récents sur les liquides ioniques pour le remplacement des solvants (Kirchhoff, 2003, Ding et *al.*, 2005, Brennecke et *al.*, 2001) ;
- la mise en place de procédés de dépollution de l'air à l'intérieur des bâtiments, procédés généralement issus et adaptés du traitement de l'air industriel.

Ces traitements de l'air confiné consistent en un assemblage de différents procédés d'épuration de l'air industriel. Plusieurs procédés peuvent être décrits (cf. figure 3) selon que l'on cherche à éliminer les particules, les micro-organismes ou les polluants chimiques gazeux. Tout comme pour les traitements d'effluents gazeux industriels, une première forme de classification de ces procédés consiste à faire la distinction entre les techniques destructives (photocatalyse, rayonnement UV germicide, ozonation, oxydation par ionisation, procédés biologiques...) et les techniques de transfert ou captation/stockage (adsorption, absorption, filtration électronique et mécanique...). D'un point de vue pratique, l'utilisation de ces dernières pose le problème de la possible ré-émission des polluants vers l'ambiance et de la maintenance des appareils (changement ou régénération du filtre). Les techniques destructives basées sur l'oxydation des espèces chimiques gazeuses posent quant à elles l'épineuse question de la production de produits secondaires (intermédiaires réactionnels) potentiellement dangereux pour la santé dans certaines conditions de fonctionnement.

Parmi tous ces procédés, aucun n'est universel et chacun possède ses avantages et ses inconvénients.

Dans ce contexte, les deux procédés les plus étudiés scientifiquement sont l'adsorption et la photocatalyse. Cependant, dans les études scientifiques, les concentrations initiales en polluants traités sont bien souvent supérieures à celles rencontrées dans les ambiances intérieures. Très peu d'études scientifiques relatent la capacité de ces procédés physico-chimiques pour l'élimination de polluants aux concentrations réelles rencontrées dans l'habitat (problèmes analytiques, de génération...).

Dans une étude réalisée pour comparer plusieurs épureurs d'air commerciaux, Shaughnessy et al. (Shaughnessy et al., 1994) ont conclu que les filtres à air de haute efficacité (filtres HEPA<sup>8</sup>) et précipitateurs électrostatiques étaient très efficaces pour l'élimination des particules mais qu'aucune des techniques testées (filtres HEPA, précipitation électrostatique, ionisation, ozonation, adsorption sur charbon actif) n'éliminaient le formaldéhyde.

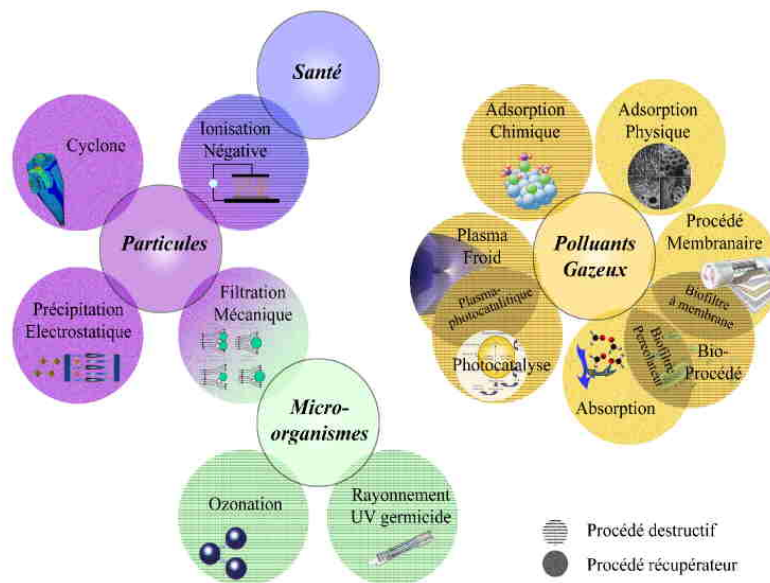


Figure 3 : Techniques d'épuration de l'air intérieur (adapté de Ribot et al., 2006).

Une étude similaire a été menée récemment en comparant 15 épureurs d'air commerciaux avec un mélange de 16 COVs représentatifs d'un air intérieur (Chen et al., 2005). Les technologies de sorption évaluées au cours de cette étude sont la filtration, l'oxydation photocatalytique, les UV, l'ozonation, l'ionisation et un prototype d'épureur d'air par les plantes (l'air contaminé est soufflé à travers la rizosphère des plantes et les contaminants sont en principe éliminés par les microorganismes du sol et les plantes, selon divers mécanismes). Les résultats sont les suivants :

<sup>8</sup> High Efficiency Particulate Air Filters.

- parmi les 7 épurateurs d'air, les traitements combinant du charbon actif avec un filtre HEPA et/ou un ioniseur, avec un seul passage d'air contaminé, ont obtenu les meilleurs rendements d'élimination pour le formaldéhyde, le toluène et le dodécane, les pourcentages d'efficacité variant de 4,32 à 39% ; les contaminants sélectionnés étaient représentatifs des composés solubles, non solubles et apolaires ;
- le traitement commercial UV n'a éliminé que certains COVs (pas de données fournies) ;
- aucun des systèmes générateurs d'ozone n'a sensiblement éliminé les COVs testés ; certains ont même générés des concentrations d'ozone à doses beaucoup plus élevées que la limite de sécurité fixée par l'OSHA (Occupational Safety et administration de la santé) ;
- l'épurateur d'air par les plantes élimine environ 20% de formaldéhyde (pour un seul passage d'air vicié), mais pas le toluène et seulement 4% de dodécane.

Les auteurs de cette étude ont conclu que seul le système biologique était capable d'éliminer sensiblement les composés organiques volatils, tels que le formaldéhyde, au contraire des processus d'adsorption qui généralement traitent de manière satisfaisante les contaminants peu solubles. La capacité globale d'élimination du biofiltre planté pour le formaldéhyde était cependant inférieure à celle du charbon actif, ceci pouvant être expliqué par le fort débit d'air à traiter sur un passage. Un taux de renouvellement d'air recommandé est généralement de 3 fois le volume de la chambre par heure pour le traitement de l'air intérieur, ce qui signifie que de très grandes quantités d'air doivent être traitées dans des unités relativement petites (pour une utilisation convenable à l'intérieur de l'espace, sans nuisances sonores ou visuelles). Cela peut être difficile à réaliser pour les purificateurs d'air à base de plantes où l'air est ventilé dans le sol, à travers les racines.

Tout ceci nous amène à conclure que les techniques classiques de traitement des effluents gazeux doivent être étudiées et adaptées au problème de la purification de l'air intérieur et des atmosphères confinées. Il semble également nécessaire d'envisager le couplage de différents procédés pour obtenir une bonne élimination de ces multi-polluants. Dans cet objectif, depuis 3 ans, nous avons axé nos travaux de recherche sur l'étude d'un couplage de procédé pour traiter la micro-pollution intérieure. Enrichis par nos précédents travaux (Gidas, 2004, Gracy, 2006) sur le traitement d'effluents gazeux industriels par procédé biologique (la biofiltration), nous avons démarré depuis 2005 une étude portant sur l'élimination de 10 COVs, représentatifs des diverses familles chimiques présentes dans les ambiances intérieures, par couplage de la biofiltration et de l'adsorption. Pour éliminer les polluants difficilement biodégradables, l'une des idées innovantes consiste à utiliser la biofiltration en synergie avec la technique complémentaire de l'adsorption. Dans

un premier temps, il a été nécessaire d'adapter le matériel analytique de caractérisation physico-chimique des polluants à cette micro-pollution intérieure. Ce n'est qu'après cette première phase difficile que les études des phénomènes physico-chimiques et biologiques mis en œuvre ont commencé. A ce niveau de pollution, ces phénomènes, complexes, sont différents de ceux rencontrés dans les traitements des effluents gazeux industriels. Leur compréhension est l'un des enjeux du développement du travail de recherche actuellement mené dans le cadre de la thèse de Michel Ondarts (financement Conseil Général Hautes Pyrénées/ADEME) qui étudie et adapte la technique du biofiltre au traitement de ces micro-pollutions. Dans cet objectif, nous nous intéressons particulièrement à un nouveau support de traitement biologique, mis au point lors des travaux de recherche de S. Gracy en collaboration avec la société Recyclage Organique Mobile (R.O.M.) de Bordères sur l'Echez. Les premiers résultats encourageants (Ondarts et *al.*, 2007) nous ont permis de mettre au point un système unique et performant pour la génération et l'analyse d'un effluent gazeux micro-pollué, constitué d'une dizaine de polluants (cf. figure 4). Ce premier travail nous a permis de répondre à une demande de la société EADS-ASTRIUM, dont l'objet était d'étudier la pertinence des procédés de photocatalyse et de traitement biologique pour régénérer l'air confiné dans une enceinte contenant 30 souris. Cette enceinte sera embarquée dans une capsule russe FOTON qui restera 3 mois en orbite autour de la Terre, le but étant à terme d'appliquer ces procédés pour les longs voyages habités vers Mars (Ramis et *al.*, 2007).

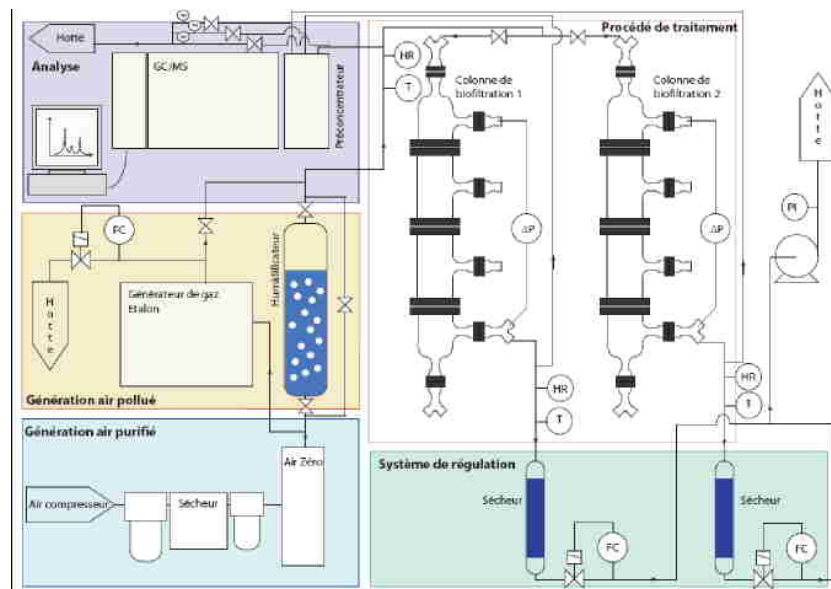


Figure 4 : Schéma de principe du pilote de génération et d'analyse d'un effluent micro-pollué.

Depuis janvier 2008, un autre projet labellisé par deux pôles de compétitivité (pôle Mov'eo « Des automobiles et transports collectifs sûrs pour l'homme et son environnement » et le pôle « Haut de Gamme Automobile »), portant sur le développement de nouveaux médias adsorbants pour la purification de l'air habitacle d'une voiture a démarré, pour une durée de 2 ans, en collaboration avec VALEO Thermique Habitacle Matériaux de Friction, RENAULT, IRMA, l'Ecole Nationale de Chimie de Rennes, l'INSERM de Rouen et le Laboratoire de Catalyse et Spectrochimie de Caen. Il s'agit ici d'étudier un procédé physico-chimique adapté à la climatisation pour traiter l'air à l'intérieur de l'habitacle automobile. L'expérience et le savoir-faire maintenant acquis font que tous les essais en conditions réelles (en particulier la reconstitution et l'analyse d'un air micro-pollué à l'intérieur d'un habitacle automobile) seront réalisés au sein de notre équipe tarbaise.

Parallèlement à ces développements, des études plus fondamentales sur la compréhension des mécanismes physico-chimiques et biologiques lors du traitement d'une atmosphère confinée sont en cours dans le cadre de la thèse de Anne Reguer (MESR) et d'un Programme de Coopération franco-mexicain Post-gradué (PCP) avec l'Université Autonome Métropolitaine de Mexico (unité Iztapalapa).

## **Conclusion**

Les problèmes de santé publique font que la qualité de l'air intérieur est aujourd'hui une priorité sanitaire. La pollution de cet air confiné, caractérisée par un très grand nombre de composés à des concentrations très faibles, est encore mal connue. D'importantes campagnes de mesures menées à l'échelle internationale permettront de mieux connaître la nature réelle de cette pollution, qui dépend principalement des us et coutumes des diverses populations à travers le monde et du climat. Les mesures sont aujourd'hui rendues possible grâce aux développements récents de moyens analytiques adaptés à cette micro-pollution ; l'action de polluants de natures différentes peuvent encore être découverte (organo-métalliques,...).

La nécessité de diminuer la consommation énergétique de notre habitat peut accroître le confinement de l'air qu'on y respire, et dégrader sa qualité. Les nombreux procédés mis au point pour traiter les effluents gazeux industriels peuvent apporter des solutions, à conditions de les adapter aux spécificités de l'air intérieur. La multiplicité des composés présents peut par exemple imposer un couplage de procédés différents. Dans ce panel de techniques, la biofiltration a des qualités qui la rendent performante (destruction des polluants, faible consommation énergétique, adaptation au moins partielle de la population microbienne aux polluants, etc.), raison pour laquelle elle intéresse un nombre croissant de secteurs industriels.



**Bibliographie**

- AFSSE, 2004, Rapport de la commission d'orientation du Plan National Santé Environnement, Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale.
- AVIGNON C., 2007, « Air : impact économique de la pollution sur la santé », *Journal de l'Environnement*, <http://www.journaldelenvironnement.net/fr>, 26/10/2007.
- AYOKO A., 2004, « The Handbook of Environmental Chemistry : Volatile Organic Compounds », *Indoor Environments*, Springer, O. Hutzinger.
- BENOIT-BROWAEYS D., 2007, « Du Nord au Sud, malades de l'environnement », *Le Monde Diplomatique*, Hors série - L'Atlas Environnement, p.60-61.
- BISANDA E.T.N., OGOLA W.O., TESHAI J.V., 2003, « Characterisation of tannin resin blends for particle board applications », *Cement and Concrete Composites*, n° 25, p. 593-598.
- BLANDIN M.C., 2008, « Les risques et dangers pour la santé humaine de substances chimiques d'usage courant : éthers de glycol et polluants de l'air intérieur. Évaluation de l'expertise publique et des choix opérés », *Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, n° 629 Assemblée Nationale, n° 176 Sénat.
- BRENNECKE J.F. & MAGINN E.J., 2001, « Ionic liquids : innovative fluids for chemical processing », *AIChE Journal*, n°47, p. 2384-2389.
- CHEN W., ZHANG J.S. & ZHANG Z., 2005, « Performance of Air Cleaners for Removing Multiple Volatile Organic Compounds in Indoor Air », *ASHRAE Transactions*, n°111(1), p. 1101-1114.
- DING J., ARMSTRONG D.W., 2005, « Chiral ionic liquids : synthesis and applications », *Chirality*, n° 17, p. 281-292.
- EDWARDS R.D., JURVELIN J., KOISTINEN K., SAARELA K., JANTUNEN M., 2001, « VOC source identification from personal and residential indoor, outdoor and workplace microenvironment samples in EXPOLIS-Helsinki, Finland », *Atmospheric Environment*, n°35, p.4829-4841.
- FISHER P.H., HOEK G., VAN REEUWIJK H., BRIGGS D.J., LEBRET E., VAN WIJNEN J.H., KINGHAM S., ELLIOTT P.E., 2000, « Traffic-related differences in outdoor and indoor concentrations of particles and volatile organic compounds in Amsterdam », *Atmospheric Environment*, n° 34, p. 3713-3722.
- GIDAS M.B., 2004, *Etude expérimentale sur la performance de systèmes de biofiltration pour le traitement d'un mélange de composés organiques volatils*, Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- GINESTET A., 2007, « Air Intérieur : derniers résultats de l'Ineris », *Journal de l'Environnement*, <http://www.journaldelenvironnement.net/fr>, 9/11/2007.
- GRACY S., 2006, *Elimination par biofiltration d'odeurs issues d'un process de compostage de boues de station*, Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.

- GRACY S., HORT C., PLATEL V., GIDAS M.B., 2006, « Volatile organic compounds (VOCs) biofiltration with two packing materials », *Environmental Technology*, n° 27, p. 1053-1061.
- JOHNSTON P.K., HADWEN G., MCCARTHY J., GIRMAN J.R., 2002, « A screening-level ranking of toxic chemicals at levels typically found in indoor air », *Indoor Air*, n°5, p. 169-177.
- JONES A.P., 1999, « Indoor air quality and health », *Atmospheric Environment*, n° 33, p. 4535-4564.
- KIRCHHOFF M.M., 2003, « Promoting green engineering through green chemistry », *Environment Science Technology*, n° 37, p. 5349-5353.
- KIRCHNER S., ARENES J.F., COCHET C., DERBEZ M., DUBOUDIN C., ELIAS P., GREGOIRE A., JEDOR B., LUCAS J.P., PASQUIER N., PIGNERET M., RAMALHO O., 2007, *Campagne nationale Logements - Etat de la qualité de l'air dans les logements français*, Observatoire de la qualité de l'air intérieur.
- LIU W., ZHANG J., ZHANG L., TURPIN B.J., WEISEL C.P., MORANDI M.T., STOCK T.H., COLOME S., KORN L.R., 2006, « Estimating contributions of indoor and outdoor sources to indoor carbonyl concentrations in three urban areas of the United States », *Atmospheric Environment*, n° 40, p. 2202-2214.
- MOSQUERON L., NEDELLEC V., 2001, *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments*, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, CSTB DDD/SB-2002-23.
- MOSQUERON L., NEDELLEC V., 2004b, *Revue des enquêtes sur la qualité de l'air intérieur dans les logements en Europe et aux Etats-Unis*, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, CSTB DDD/SB-2004-45.
- MOSQUERON L., NEDELLEC V., 2004a, *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments : Actualisation des données sur la période 2001-2004*, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, CSTB DDD/SB-2004-44.
- OHURA T., AMAGAI T., SENGAI Y., FUSAYA M., 2007, « Organic air pollutants inside and outside residence », *Science of the total environment*, n° 144, p. 513-522.
- ONDARTS M., HORT C., PLATEL V., SOCHARD S., 2007, « Evaluation of Indoor Air treatment by two pilot-scale biofilters packed with compost and compost-based material, AIR POLLUTION », *Fifteenth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution*, Algarve, Portugal, Wessex Institute of Technology.
- PHILLIPS M., HERRERA J., KRISHNAN S., ZAIN M., GREENBERG J., CATANEO R.N., 1999, « Variation in volatile organic compounds in the breath of normal humans », *Journal of Chromatography B.*, n° 729, p. 75-88.
- POUPARD O., BLONDEAU P., IORDACHE V., ALLARD F., 2005, « Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools », *Atmospheric Environment*, n° 39, p. 2071-2080.

- RAMIS A., HORT C., SOCHARD S., PLATEL V., BELLOSSI F., 2007, « Treatment of the confined air of a spacecraft cabin », *Congress On Biotechniques For Air Pollution Control*, La Coruña 3-5 Oct 2007, Spain.
- RIBOT B., FROCHOT D., BLONDEAU P., GINESTET A., SQUINAZI F., DE BLAY F., OTT M., 2006, *Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration*, Convention ADEME-EDF n° 04 04 C 0080.
- RUZSANYI V., BAUMBACH J.I., SIELEMANN S., LITTERST P., WESTHOFF M., FREITAG L., 2005, « Detection of human metabolites using multi-capillary columns coupled to ion mobility spectrometers », *Journal of Chromatography Apply*, n° 1084, p. 145-151.
- SAKAI K., NORBÄCK D., MI Y., SHIBATA E., KAMIJIMA M., YAMADA T., TAKEUCHI Y., 2004, « A comparaison of indoor air pollutants in Japan and Sweden: formaldehyde, nitrogen dioxide, and chlorinated volatile organic compounds », *Environmental Research*, n° 94, p. 75-85.
- SHAUGHNESSY R.J., LEVETIN E., BLOCKER J., SUBLETTE K.L., 1994, « Effectiveness of portable indoor air cleaners : sensory testing results », *Indoor Air*, n°4, p. 179-188.
- VINOD KUMAR K.P., SETHURAMAN M.G., 2004, « Studies on oleoresinous varnishes and their natural precursor », *Progress in Organic Coatings*, n° 49, p. 244-251.
- WHO, 2003, *Housing and health : identifying priorities*, World Health Organization Regional Office for Europe.
- WHO, 2004, *Plan d'action pour l'environnement et la santé des enfants en Europe*, World Health Organization.
- ZHANG J., LLOYD P.J., 1994, « Ozone in Residential Air : Concentrations, I/O ratios, indoor chemistry and exposures », *Indoor Air*, n° 4, p. 95-102.
- ZHANG J., WILSON W.E., LLOYD P.J., 1994, « Indoor air chemistry : formation of organic acids and aldehydes », *Environmental Science and Technology*, n° 28, p. 1975-1982.
- ZURAIMI M.S., ROULET C.A., THAM K.W., SEKHAR S.C., CHEONG K.W.D., WONG N.H., LEE K.H., 2006, « A comparative study of VOCs in Singapore and European office buildings », *Building and Environment*, n° 41, p. 316-329.