Les épurateurs d'air : la solution ou le pire ?

Patrice BLONDEAU*, Alain GINESTET, F. SQUINAZI***, B. RIBOT****, Frédéric de BLAY*****

** LEPTAB/Université de La Rochelle*
Avenue Crépeau – 17042 La Rochelle Cedex 1.
patrice.blondeau@univ-lr.fr

*** CETIAT, 27-29, boulevard du 11 Novembre 1918*
BP 2042 – 69603 Villeurbanne Cedex

**** Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris*
11, rue George Eastman – 75013 Paris

***** EDF R&D, avenue des Renardières – Écuelles*
77818 Moret-sur-Loing Cedex

****** Hôpital Lyautey – 1, rue des Canonniers – BP 426*
67091 Strasbourg Cedex

La qualité de l'air intérieur s'est imposée au cours de la dernière décennie comme une composante majeure de la qualité des ambiances intérieures. Enjeu majeur pour les pouvoirs publics en raison de sa contribution à l'exposition des populations (les citadins passent plus de 80 % de leur temps dans des environnements clos), elle constitue aussi une préoccupation sociale, et par voie de fait un marché économique prometteur pour qui offre des solutions abordables au plus grand nombre. Plusieurs industriels – asiatiques pour la plupart – et distributeurs l'ont bien compris en proposant dans leurs points de vente une large gamme d'épurateurs d'air domestiques à prix tout à fait raisonnables. La publicité faite autour de ces appareils s'accompagne souvent de slogans aguichants et d'annonces de performances mirobolantes certifiées par d'illustres chercheurs (sic !), sans pour autant que l'acheteur n'ait pourtant une quelconque garantie sur l'efficacité réelle des appareils, voire et c'est peut-être là le plus important, leur innocuité.

Courant 2005, un consortium d'équipes de recherche composé de la Direction des études et recherches d'EDF, du Centre technique des industries aérauliques et thermiques (CETIAT), du Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris (LHVP), des Hôpitaux universitaires de Strasbourg et du LEPTAB de l'Université de La Rochelle, a entamé dans le cadre du programme « Bâtiment à l'horizon 2010 » une réflexion visant à proposer une norme pour mesurer l'efficacité et vérifier l'innocuité des épurateurs d'air domestiques. Cette étude, soutenue financièrement par l'ADEME, était composée de quatre phases [1] : l'établissement d'un état du marché des épurateurs d'air en France, aux États-Unis, au Japon et en Scandinavie, le recensement et l'analyse des normes d'essai existantes, la description du mode de fonctionnement des différentes techniques d'épuration qui sont implémentées dans les appareils, et finalement la proposition d'un protocole d'essai qui intègre les spécificités environnementales des ambiances intérieures. Cet article est plus particulièrement ciblé sur les deux dernières composantes de l'étude. À travers une classification des techniques existantes, puis la description détaillée de deux techniques ou familles de techniques émergentes que sont la photocatalyse et l'ionisation de l'air, il vise à démontrer l'efficacité potentielle de ces systèmes vis-à-vis des polluants ciblés, mais aussi et surtout les effets inattendus qu'ils peuvent avoir sur la qualité de l'air intérieur. La prise en compte de ce facteur a en effet grandement présidé à la proposition du protocole d'essai, dont les grandes lignes sont décrites dans le dernier paragraphe.

Recensement et classification des techniques d'épuration

Les épurateurs d'air consistent le plus souvent en un assemblage de différentes techniques d'épuration de l'air. Bien que le manque de précision terminologique volontaire ou involontaire des fabricants rende parfois difficile l'identification précise des procédés implémentés dans les appareils à partir du simple examen de leur documentation technique ou commerciale, il est toutefois possible de considérer que ces procédés se rapportent à l'une des dix techniques répertoriées sur la Figure 1. Cette figure propose une classification suivant deux critères, le premier d'entre eux étant le type de polluants visé *a priori* par la technique : gaz (incluant les odeurs), particules inertes ou micro-organismes. Il est à noter que si des relations univoques peuvent être établies dans la plupart des cas, la classification de la filtration mécanique comme technique agissant sur les particules inertes (poussières, fibres) mais aussi les micro-organismes se justifie par le fait que d'une part, les filtres utilisés sont dans la grande majorité des cas des filtres à haute efficacité (de type HEPA) capables de capter efficacement les particules de la taille des virus (inférieure à 0.1 µm) et surtout des bactéries (diamètre aéraulique compris entre 0.1 et 3 µm), et d'autre part, que de plus en plus de fabricants proposent des filtres bio-statiques, c'est-à-dire traités en usine avec une substance biocide destinée à tuer les micro-organismes captés dans l'air et à éviter que le filtre ne devienne lui-même un lieu de prolifération de ces micro-organismes. Il convient également de relever que l'ionisation négative de l'air ne peut être répertoriée dans ce mode de classification par polluant dans le sens où elle ne vise pas à éliminer les polluants contenus dans l'air, mais à produire à partir de l'oxygène des ions négatifs qui auraient un impact direct sur la santé [2].

Le deuxième critère de classification utilisé sur la Figure 1 consiste à distinguer les techniques fonctionnant par captation/stockage des polluants de celles fonctionnant par transformation ou élimination. D'un point de vue pratique, la première famille de techniques pose le problème de la possible ré-émission possible 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 gazeuses (photocatalyse, plasma froid, adsorption chimique) posent quant à elles l'épineuse question des produits de dégradation, question dont il est largement fait état dans les paragraphes qui suivent.

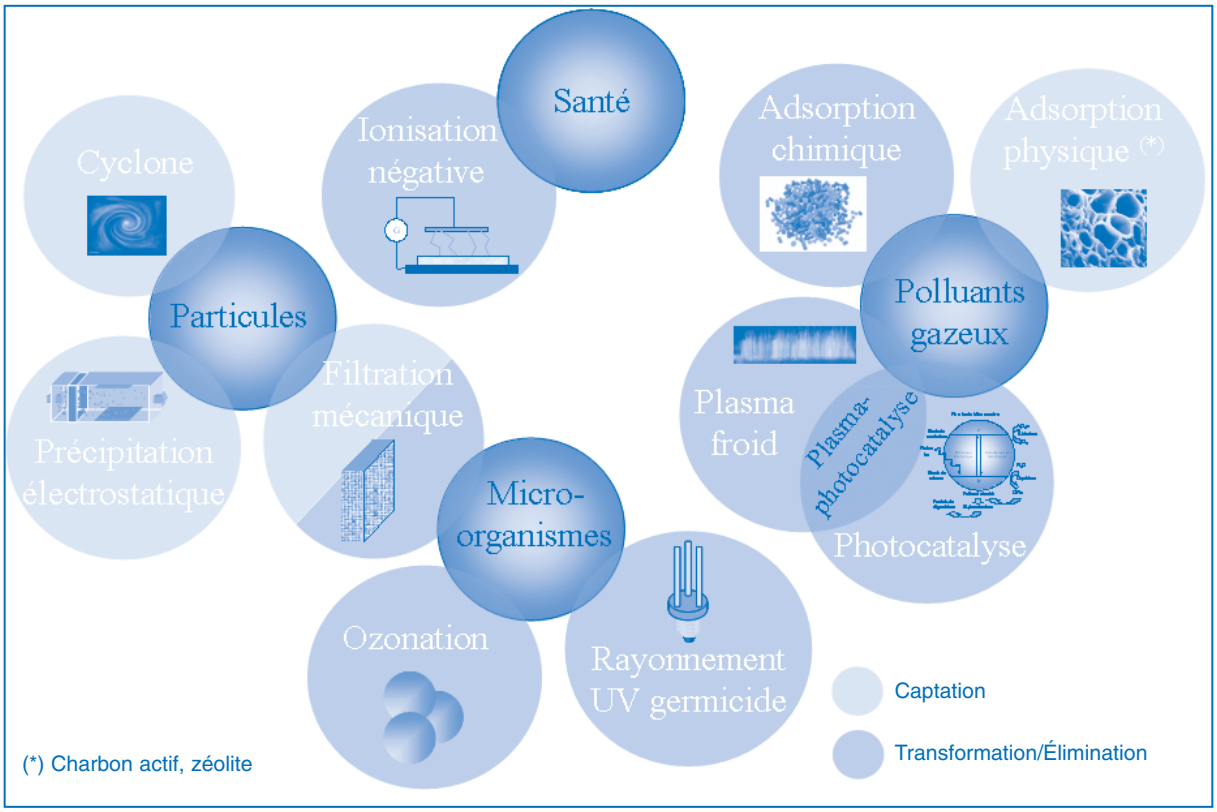


Figure 1.
Recensement et classification des techniques d'épuration de l'air.

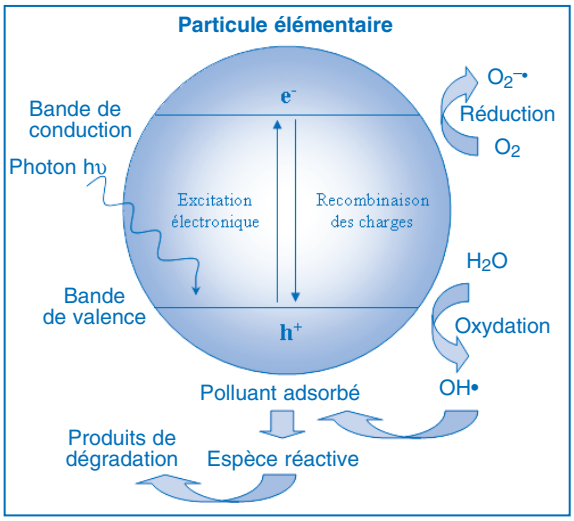


Figure 2.
Représentation schématique
du mécanisme de dégradation photocatalytique.

Photocatalyse : des questions en suspens

Largement utilisée depuis des années pour le traitement de l'eau, la photocatalyse s'impose désormais comme une technique innovante pour le traitement de la pollution gazeuse des ambiances intérieures, et notamment l'élimination des odeurs. Son principe consiste à décomposer les molécules organiques par une succession de réactions chimiques conduisant à leur minéralisation, c'est-à-dire leur transformation en dioxyde de carbone (CO_2) et vapeur d'eau (H_2O). Ces réactions de dissociation sont initiées par une lampe à ultra-violets qui irradie la surface d'un matériau semi-conducteur, généralement du dioxyde de titane (TiO_2). Sous l'effet de l'absorption des photons, des électrons situés dans la bande de valence du semi-conducteur sont transférés dans la bande de conduction, contribuant à produire des ions superoxydes (O_2-), des radicaux hydroxyles (OH) et des radicaux hydroperoxydes (HO_2) à partir de l'oxygène et de la vapeur d'eau contenus dans l'air (Figure 2). Ces espèces très réactives enclenchent alors les mécanismes chimiques conduisant à la minéralisation des composés organiques [3].

De par ses caractéristiques, la photocatalyse présente assurément un grand nombre d'atouts pour le traitement de l'air intérieur. Peu gourmande en énergie, elle opère à température ambiante et permet sous certaines conditions d'éliminer d'autres polluants que les composés organiques volatils. À l'instar de ce qui se passe dans l'atmosphère et pour peu que la lampe libère une énergie suffisante dans le domaine des UV, le rayonnement lumineux peut en effet contribuer à dissocier photochimiquement les molécules d'ozone et de dioxyde d'azote présentes dans l'air. Par ailleurs, si ce rayonnement comprend une composante germicide (bande de spectre UV autour de 254 nm), l'accrochage des micro-organismes à la surface du semi-conducteur peut induire un temps d'exposition suffisamment long pour que les micro-organismes soient bloqués dans leur reproduction (effet bactério-

statique), voire détruits (effet bactéricide). Cette caractéristique conduit d'ailleurs certains fabricants de matériels à définir la photocatalyse comme une technique dédiée exclusivement ou prioritairement au traitement de la pollution microbiologique, ce qui n'est bien sûr pas tout à fait exact.

Dans le cadre des applications liées à la qualité de l'air intérieur, les problèmes posés par cette technique sont quant à eux de deux ordres. Le premier est la désactivation possible du photocatalyseur par l'encrassement ou la génération de résidus de réaction (ions sulfates ou benzaldéhyde par exemple) qui conduisent à la perte de sites actifs à la surface du semi-conducteur, réduisant voire annihilant ainsi l'adsorption des COV et de la vapeur d'eau, première étape du processus de photodégradation [4]. Le second, plus grave, réside dans la génération possible de produits intermédiaires ou de dégradation indésirables. Nimlos *et al.* ont par exemple montré que les produits intermédiaires conduisant à la minéralisation de l'éthanol (C_2H_6O) sont l'acétaldéhyde (C_2H_4O), l'acide acétique ($C_2H_4O_2$), le formaldéhyde (HCHO) et l'acide formique (CH_2O_2) [5]. Si le temps de résidence de l'air dans l'appareil est insuffisant pour que le processus de minéralisation soit complètement achevé, ces produits intermédiaires se retrouvent dans l'air traité en quantité plus ou moins importante, substituant donc la pollution ambiante par une autre pollution, potentiellement plus dangereuse pour la santé humaine. Bien que fréquemment occulté, ce problème de production de composés nocifs concerne également la dégradation des composés organiques chlorés (émis par les matériaux de revêtement notamment), bromés (retardateurs de flamme) ou phosphorés (pesticides ménagers) qui pénètrent dans l'appareil. Des essais en laboratoire tendent à démontrer que le chlore apparaît sous la forme d'acide chlorhydrique à la sortie du photocatalyseur. Qu'en est-il des autres atomes ? Il s'agit là d'une question bien légitime à laquelle ne semble pourtant pas pressés de répondre les fabricants.

Ionisation :
des techniques et des effets multiples

L'utilisation du terme d'ionisation de l'air est souvent source d'ambiguïté quant aux effets réellement suscités par cette technique. D'après sa définition originelle, l'ionisation est le processus ou le résultat du processus par lequel une molécule ou une particule électriquement neutre acquiert une charge électrique positive ou négative. Elle résulte du passage de l'air à travers un champ électrique de très fort voltage (plusieurs milliers de volts) qui, dans le cadre des applications visées, est obtenu par décharge couronne ou par décharge à barrière diélectrique. En toute rigueur, le terme d'ionisation devrait donc être considéré comme un terme générique désignant toutes les formes d'exploitation de l'électricité pour le traitement de l'air. En pratique, il est le plus souvent réservé pour désigner ce qui est ci-après décrit comme l'ionisation négative. L'exploitation des mécanismes physico-chimiques faisant suite au passage de l'air dans le champ électrique donne pourtant lieu à d'autres procédés d'épuration, comme l'illustre la Figure 3, élaborée à partir des considérations de Daniels [6]. Cette dernière montre que les ions positifs créés à partir de l'oxygène et de l'azote de l'air, N_2^+, O_2^+, N^+ et O^+, sont en quelques microsecondes convertis en ions hydronium, H_3O^+, et en hydrates protonés, (H_3O^+, $n H_2O$), $n < 10$. L'attachement de ces ions sur les particules en suspension dans l'air contribue à les charger électriquement (gros ions), permettant ou facilitant ainsi leur captation en aval sur des plaques de charge électrique inverse – principe de la précipitation électrostatique – ou à la surface des matériaux du bâtiment, définissant ainsi ce que nous appellerons ici l'ionisation simple.

Les électrons libres se lient quant à eux aux molécules de dioxygène pour former des ions négatifs ($O^{\bullet -}$, $O_2^{\bullet -}$, $O_3^{\bullet -}$), qui sont les éléments qui auraient des vertus physiologiques et qui constituent donc l'effet recherché par ce que l'on appelle communément les ionisateurs d'air. Ces ions ont toutefois une durée de vie assez courte dans l'air. Une partie réagit avec la vapeur d'eau pour former des hydrates, mais la majorité interagit avec les polluants gazeux ou les particules en suspension dans l'air, contribuant à deux phénomènes d'épuration supplémentaires :

- bien que cela ne transparaisse pas explicitement dans la littérature scientifique et que l'information est donc sujette à forte caution, certains fabricants d'ioniseurs d'air affirment que les ions négatifs peuvent annuler, voire inverser, la charge électrique de particules naturellement chargées positivement, tels que les allergènes (pollens notamment). Si cette inversion de charge est réelle, elle peut alors effectivement donner lieu à un phénomène d'agrégation avec les gros ions positifs (particules de charge positive), c'est-à-dire à la formation de grosses particules, lourdes, qui vont rapidement se sédimenter sous l'effet de la gravité. On retrouve donc là le principe de l'ionisation simple préalablement évoqué ;
- les interactions avec les molécules gazeuses, qui sont elles avérées, se caractérisent par le déclenchement de réactions chimiques en cascade qui peuvent conduire à la minéralisation complète des composés organiques volatils. Il s'agit là du processus correspondant au principe d'épuration par plasma froid, qui s'apparente à celui de la photocatalyse, si ce n'est que l'ensemble des réactions se produit en phase gazeuse et non à la surface du matériau semi-conducteur.

En définitive, bien que les fabricants d'épurateurs visent *a priori* une exploitation et une famille de polluants bien déterminées, l'ionisation de l'air peut dans les faits avoir de multiples conséquences sur la composition chimique et particulaire de l'air. À titre d'exemple, un précipitateur électrostatique captera certes un certain nombre de particules contenues dans le flux d'air traité, mais pourra aussi contribuer à minéraliser les molécules gazeuses organiques… et éventuellement à générer des produits de dégrada-

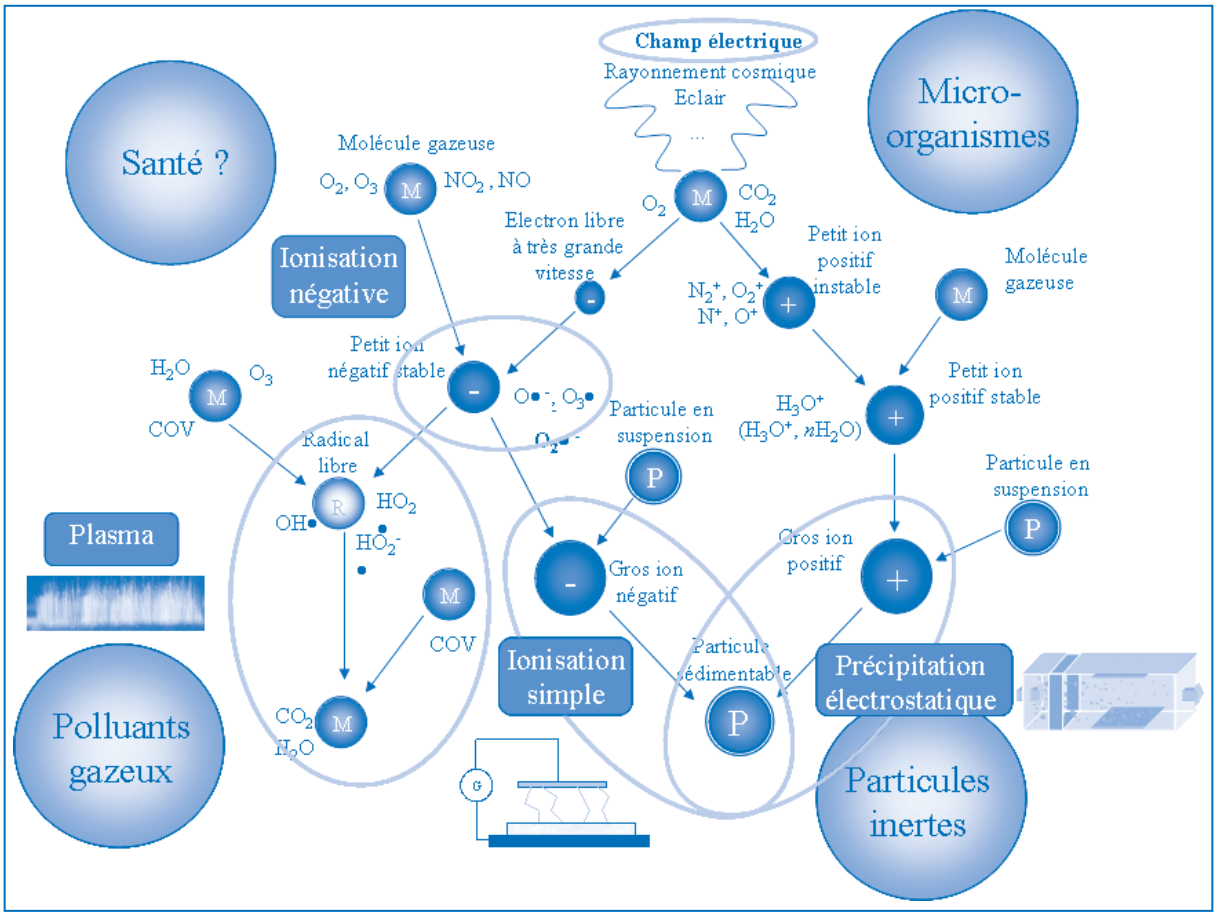


Figure 3.
Analyse des mécanismes physico-chimiques résultant de l'ionisation de l'air.

tion toxiques ! Par ailleurs, il est légitime de se poser la question de la viabilité des organismes vivants au passage d'un champ électrique de fort voltage, ce qui par rebondissement laisse à penser que la précipitation électrostatique puisse également avoir un effet significatif sur la pollution microbiologique de l'air. Cette dimension « multi-polluants » avérée ou suspectée constitue un des fondements du protocole d'essai décrit dans le paragraphe suivant.

Protocole d'essai

Conformément à l'architecture de l'étude, le protocole de test proposé pour la qualification des épurateurs d'air est né de la synthèse des analyses des matériels disponibles sur le marché, du mode de fonctionnement des techniques d'épuration implémentées dans les appareils, et des normes ou protocoles d'essai existants dans le monde. Il s'articule autour de trois points fondateurs qui lui confèrent à la fois son originalité et sa représentativité : la réalisation systématique d'essais avec des polluants de nature différente, la mise en œuvre de conditions environnementales représentatives des environnements intérieurs à l'entrée de l'appareil, et la vérification de son innocuité par la mesure des concentrations en produits de dégradation nocifs à sa sortie. Tous les détails relatifs à ce protocole peuvent être trouvés dans le rapport d'étude remis à l'ADEME [1]. N'en sont livrées ici que les grandes lignes.

Banc d'essai

Deux types de banc d'essais peuvent être utilisés pour évaluer les performances de l'épurateur d'air : une chambre environnementale ou un conduit aéraulique. Dans le cas de la chambre environnementale, le principe est de mesurer l'aptitude de l'appareil à faire diminuer la pollution initialement générée dans l'ambiance. Dans le cas du conduit aéraulique, l'appareil raccordé à une gaine en amont comme en aval de l'écoulement d'air travaille à son débit nominal et traite un niveau de pollution constant pendant toute la durée de l'essai. Si elles sont correctement mises en œuvre, les deux méthodes doivent conduire à la même mesure d'efficacité.

Conditions environnementales d'essai

Le protocole prévoit que la performance des appareils testés soit évaluée pour quatre types de polluants : gaz, particules, micro-organismes et allergènes. Face au grand nombre de substances gazeuses pouvant être considérées comme polluants des ambiances intérieures, le toluène (C_7H_8) a été retenu pour sa représentativité dans les logements (valeurs

comprises entre 1,4 et 199,1 µg/m³ et médiane du ratio C_{int}/C_{ext} = 3,7 d'après les résultats de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur), mais aussi pour ses propriétés physico-chimiques qui le définissent comme un composé « moyen » tant au niveau de sa masse molaire que de sa température d'ébullition. L'aérosol sélectionné pour tester les capacités d'épuration particulaire des appareils est constitué de particules de latex couvrant le spectre granulométrique 0,2-5 µm. La bactérie *Bacillus subtilis var. niger* (NCTC 10073, ATCC 6633, DSM 2277) et le champignon *Aspergillus niger* (ATCC 16404), qui survivent bien dans l'environnement et sont eux aussi représentatifs de la contamination microbienne d'une atmosphère intérieure, ont tous deux été choisis comme traceurs de la pollution microbiologique. Enfin, l'allergène servant de support aux tests d'efficacité est l'allergène majeur de chat Fel d 1 *(Felis domesticus* 1). Ce dernier est majoritairement transporté par des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 5 µm qui peuvent rester longtemps en suspension dans l'air, contrairement aux allergènes de blattes ou d'acariens qui sont essentiellement répartis sur des particules plus lourdes, de l'ordre de 10 µm de diamètre, et qui se sédimentent ainsi rapidement.

Comme mentionné précédemment, pour juger objectivement de la performance des appareils et de surcroît ne pas pénaliser les techniques qui ne peuvent opérer correctement en situation de très forte pollution de l'air, des moyens métrologiques adaptés doivent être mis en place pour doser les polluants à des concentrations de l'ordre de grandeur de celles mesurées dans les environnements intérieurs. La concentration en toluène à l'entrée de l'appareil est par exemple fixée à 100 ppb pour la méthode en conduit aéraulique.

Expression des performances

La capacité d'épuration de l'appareil vis-à-vis de chacun des polluants étudiés est exprimée par le calcul des débits d'air épurés correspondants (CADR pour *Clean Air Delivery Rate).* Cette grandeur, exprimée en m³/h, est définie par le produit du débit d'air traité par l'appareil et de l'efficacité d'épuration (ratio des concentrations entre la sortie et l'entrée de l'épurateur). Pratiquement le CADR correspond au débit d'air propre (libre de contaminants) avec lequel il faudrait ventiler la pièce dans laquelle se trouve l'appareil d'épuration d'air pour obtenir le même niveau de pollution intérieure. Outre cette référence à une ventilation équivalente, qui constitue un point de repère intéressant, l'avantage de l'indice CADR est qu'il ne dépend pas de l'environnement d'essai et notamment des dimensions géométriques de la chambre environnementale.

Évaluation de la production de composés secondaires

Deux composés, l'ozone et le formaldéhyde, ont été sélectionnés comme traceurs de la production d'éléments nocifs. Le premier est un produit caractéristique des appareils utilisant les principes de l'ozonation et de l'ionisation, tandis que le second est un produit de dégradation caractéristique des techniques d'épuration par oxydation. Parallèlement à ces aspects techniques, le choix de ces deux traceurs a été motivé par le fait qu'ils font tous deux l'objet de nombreuses études depuis des années. Les processus actuels d'élaboration de valeurs guides pour l'air intérieur doivent par conséquent faciliter la définition de taux de production admissibles par les autorités sanitaires compétentes (problème hors cadre de la présente étude).

Conclusion

Comme dans tous les domaines, il n'existe pas de méthode parfaite pour tester les épurateurs d'air domestiques. La multiplicité des polluants rencontrés dans les bâtiments, combinée à la diversité des matériels proposés et des conditions environnementales dans lesquelles ils sont amenés à opérer, rend d'autant plus difficile l'élaboration d'un protocole d'essai représentatif, objectif et consensuel. Dans ce contexte, l'analyse fine des mécanismes de captation, élimination ou transformation mis en jeu dans les appareils constitue indéniablement une démarche pertinente pour réduire le problème et en cerner tous les contours. Les choix opérés demeurent nécessairement discutables et impliquent la mise en œuvre de moyens conséquents, mais nul ne peut contester que le protocole proposé constitue une avancée significative par rapport aux normes existantes dans ce domaine. De norme il est d'ailleurs question puisque l'objectif avoué du *consortium* est que ce protocole serve de base de discussion à un groupe AFNOR. Avant cela, sa faisabilité sera vérifiée dans le cadre d'une nouvelle étude, financée par l'ADEME et la Direction Générale de la Santé. Cette étude prévoit la validation d'un banc expérimental de type conduit aéraulique ainsi que la réalisation de la batterie complète de tests pour deux épurateurs différents.

Références

[1] Ribot B, Blondeau P, Ginestet A, Squinazi F, De Blay F, Ott M, Frochot D. Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration d'air. Rapport final de la convention ADEME-EDF n° 04 04 C 0080. 2006. Responsable ADEME : Pierre Deroubaix.

[2] Déoux P, Déoux S. L'écologie c'est la santé – L'impact des nuisances de l'environnement sur la santé. Éditions Frison-Roche, Paris 1993.

[3] Bulteau G. Définition d'une méthodologie d'évaluation des procédés d'élimination des composés organiques volatils de l'air intérieur. Thèse École des Mines de Nantes 2004.

[4] Zhao J, Yang X. Photocatalytic oxidation for indoor air purification : a literature review. *Building and Environment* 2003 ; 38 : 645-54.

[5] Nimlos MR, Wolfrum EJ, Brewer ML, Fennell JA, Bintner G. (1996) Gas-phase heterogeneous photocatalytic oxidation of ethanol: pathways and kinetic modeling. *Environmental Science and Technology* 1996 ; 30 : 3102-10.

[6] Daniels SL. On the ionization of air for removal of noxious effluvia. Air ionization of indoor environments for control of volatil and particulate contaminants with nonthermal plasmas generated by dielectric-barrier discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2002 ; 30 : 1471-80.