

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2017

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2017

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 29 septembre 2017

AVIS¹ **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,** **de l'environnement et du travail**

relatif à « l'identification et l'analyse des différentes techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes »

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue un enjeu de santé publique en France et dans de nombreux pays, dont la population est de plus en plus consciente. En effet, l'environnement intérieur offre une grande diversité de situations d'exposition à de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, dont les conséquences sur la santé varient notamment selon la nature des polluants, les caractéristiques des expositions, etc. Différentes sources peuvent être à l'origine de la présence de polluants dans l'air intérieur : des sources propres au bâti, à son environnement, à ses équipements ou aux comportements de ses occupants. Des dispositions existent dans les Codes de l'Environnement, de la Construction et de la Santé publique, qui définissent la politique pour la qualité de l'air intérieur.

Pour réduire l'exposition aux polluants de l'air intérieur, les recommandations actuelles des pouvoirs publics portent en priorité sur la limitation des émissions à la source, l'aération et la ventilation.

Depuis ces dernières années le marché de l'épuration de l'air intérieur se développe avec la commercialisation d'équipements revendiquant des propriétés d'épuration de l'air intérieur sous forme d'appareils autonomes, ainsi que des matériaux de construction et de décoration mettant en avant leurs propriétés dépolluantes. Ces dispositifs et produits sont destinés à toute la population, mais peuvent cibler particulièrement les sujets sensibles ou sensibilisés.

Cependant la question de leur efficacité et surtout celle de leur innocuité se pose.

La veille scientifique menée par l'Anses sur le sujet, l'a conduite à consulter son comité d'experts spécialisé en charge de l'« évaluation des risques liés aux milieux aériens » qui a attiré l'attention de l'Anses sur des travaux portant sur les intérêts et les limites de la photocatalyse, et la mesure

¹ Annule et remplace la version du 23 juin 2017. La nature des modifications est présentée en annexe.

des performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes pour les applications tertiaires et résidentielles. Des études ont en effet mis en évidence le fait que des dispositifs d'épuration de l'air mettant en œuvre le principe de la photocatalyse, présentaient une efficacité variable, parfois faible, et pouvaient être responsables de la formation dans l'air de sous-produits réactionnels potentiellement dangereux. Ces résultats concernaient des épurateurs d'air photocatalytiques autonomes commercialisés pour le grand public mais également des appareils photocatalytiques distribués en milieux industriels.

Les conclusions d'un atelier scientifique sur l'état des connaissances scientifiques relatives à l'efficacité et l'innocuité des procédés d'épuration de l'air utilisant la photocatalyse dans les environnements intérieurs et les perspectives de développement de ces procédés organisé le 2 avril 2012 par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) en partenariat avec l'université de la Rochelle ont montré que si le principe de la photocatalyse peut présenter une efficacité potentielle sur de nombreux polluants de l'air intérieur, il présente néanmoins des inconvénients.

Dans ce contexte, le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » a pointé l'importance de travailler sur cette problématique et a encouragé l'Anses à s'autosaisir sur le sujet.

Considérant ces éléments, l'Anses s'est autosaisie le 10 octobre 2012 sur les deux questions suivantes :

1. Recenser les techniques d'épuration de l'air utilisées en environnement intérieur pour le grand public et pour de petites unités volumétriques ou en traitement d'appoint en milieu professionnel² (caractéristiques techniques, modalités de mise en œuvre, processus d'élimination, efficacité revendiquée, spectre d'activité pour les substances chimiques, particules, agents biologiques, etc.),
2. Rassembler et analyser les connaissances disponibles sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation de ces nouvelles³ techniques d'épuration d'air, notamment en présence de mélanges de polluants (polluants traités, non traités et secondaires) et en fonction de la mise en œuvre des dispositifs. Il ne s'agira pas d'évaluer l'efficacité des différents dispositifs disponibles sur le marché. Les techniques reposant sur la filtration ne sont pas couvertes.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

2.1. Organisation

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'Anses a mandaté trois experts rapporteurs *intuitu personae* pour appuyer l'unité d'évaluation des risques liés à l'air de l'agence dans la réalisation de l'expertise. Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques, entre octobre 2012 et décembre 2016. Le rapport produit par l'Anses et les experts rapporteurs tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

² Les dispositifs utilisés en milieu industriel ; et les systèmes d'épuration d'air intégrés aux systèmes de ventilation des bâtiments collectifs, sont exclus du champ de la saisine.

³ L'auto-saisine porte sur les techniques d'épuration émergentes. L'évolution de la qualité de l'air liée à l'utilisation de systèmes de filtration n'a donc pas été traitée dans le cadre de cette expertise.

In fine, les travaux d'expertise ont été adoptés par le CES «Evaluation des risques liés aux milieux aériens» lors de sa séance du 30 janvier 2017.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

2.2. Méthodologie

2.2.1. Recensement des techniques d'épuration d'air

Une étude de marché commanditée par l'Anses a été réalisée, en 2015, par le bureau d'étude Nomadéis, en partenariat avec l'ULR-Valor, filiale de l'Université de La Rochelle dédiée à la valorisation des résultats de la recherche de l'établissement, après appel d'offres.

L'analyse du marché de l'épuration de l'air intérieur s'est appuyée sur :

- Une analyse documentaire de catalogues, documents techniques, monographies, modes d'emploi et contenus de pages web des fabricants et distributeurs,
- Vingt-huit entretiens qualitatifs auprès d'experts (instituts de recherche, institutions, etc.), fabricants et distributeurs de produits d'épuration de l'air intérieur et prescripteurs (architectes conseil, associations de consommateurs, conseillers en environnement intérieur, médecins),
- Des visites de terrain dans des commerces et au salon professionnel annuel Pollutec,
- Une consultation en ligne des fabricants et distributeurs, d'une durée de 6 semaines, afin de recueillir principalement les données économiques et les données techniques ayant été pré-identifiées lors des recherches documentaires.

2.2.2. Rassembler et analyser les connaissances disponibles sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation des nouvelles techniques d'épuration d'air

L'évaluation de la qualité de l'air associée à l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur a été basée sur une revue de la littérature scientifique.

Des requêtes ont été formulées dans la base de données bibliographique Scopus pour la période 2008 à 2016 avec les groupes de mots clés suivants :

- *Indoor air ;*
- *Purification OR treatment OR cleaning OR filtration OR cleaner OR purifier OR filter*

Plus de 2300 publications scientifiques ont ainsi été répertoriées. Un tri a été réalisé en analysant les titres et les résumés de ces publications afin d'éliminer dans un premier temps celles qui n'entraient pas dans le champ de l'expertise (classées « hors sujet »). Cette approche a reposé principalement sur l'exclusion des articles portant sur :

- l'efficacité énergétique, les systèmes centralisés de type HVAC⁴ ou les dispositifs à intégrer dans des gaines de ventilation (systèmes dits « *in duct* »),
- la recherche et le développement de techniques d'épuration et de nouveaux matériaux au stade expérimental,
- des locaux particuliers (ex. salle propre (*clean room*), bâtiments agricoles).

Près de 90% des publications ont ainsi été classées « hors sujet » conduisant à un ensemble de 189 articles originaux à analyser. Ces articles fournissent en particulier des éléments sur :

- un descriptif et une discussion des technologies d'épuration d'air,
- des résultats de mesures sur site,
- les polluants visés par les technologies d'épuration.

Les publications relatives à des essais réalisés en conditions réelles ou comparables aux conditions réelles avec des appareils commercialisés ont été privilégiées. Par conditions réelles ou proches de la réalité, on entend des essais réalisés dans des locaux d'habitation ou dans des « grandes » chambres d'essais, avec un polluant ou un mélange de polluants dans des concentrations « proches » des concentrations rencontrées dans les environnements intérieurs tels que les logements.

Par conséquent, les références traitant de tests d'efficacité expérimentaux et de modélisation à la fois au niveau de l'efficacité ou des concentrations ont été a priori écartées du champ de ce travail d'analyse bibliographique, sauf si ces essais étaient réalisés dans des conditions proches de conditions réelles.

3. SYNTHÈSE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DU CES

Le CES rappelle que l'objectif de ces travaux n'était pas d'évaluer la pertinence globale de l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur, mais d'évaluer l'impact de l'utilisation de plusieurs de ces dispositifs sur la qualité de l'air, en d'autres termes, d'analyser les polluants effectivement traités et les polluants potentiellement émis par ces dispositifs.

3.1. Identification des principales techniques d'épuration de l'air actuellement mises en œuvre

L'épuration de l'air repose sur deux grands principes : le piégeage des contaminants ou leur destruction. Les techniques mettant en œuvre ces deux grands principes sont intégrées dans des appareils autonomes ou des systèmes HVAC. Elles sont décrites dans ce qui suit.

⁴ L'acronyme HVAC (*Heating, ventilation, air conditioning/ chauffage, ventilation, conditionnement de l'air*), usuellement utilisé au niveau mondial, fait référence à des systèmes regroupant les équipements nécessaires pour le chauffage, la ventilation et la climatisation à l'échelle d'un bâtiment : chaudières/chaufferies, refroidisseurs, centrales de traitement d'air, ventilateurs d'extraction, filtres, conduits (US-EPA 1991). Mais tous les systèmes HVAC ne sont pas conçus pour répondre à ces trois fonctions. Le terme HVAC regroupe une grande variété de dispositifs allant de l'appareil autonome jusqu'à des systèmes centralisés desservant plusieurs espaces intérieurs d'un bâtiment. (US-EPA 1991).

3.1.1. Les techniques de piégeage

a) La filtration

La filtration est une opération qui consiste à piéger des particules de l'air sur la base de phénomènes physiques et mécaniques : le tamisage, l'inertie, l'interception et la diffusion. Cette opération est réalisée en utilisant un média qui est le support sur lequel est réalisée la filtration. Le média fibreux filtrant peut-être de nature variable : fibres organiques d'origine naturelle (coton, lin, chanvre), fibres de cellulose régénérée, fibres synthétiques (polyester, polyéthylène, polyamide ou autres polymères), fibres inorganiques (minérales/céramiques, fibres de verre, fibres métalliques et fibres de carbone).

Les filtres utilisés en traitement de l'air sont majoritairement dédiés au dépolluage. Il existe plusieurs types de filtres en fonction, notamment, de la granulométrie des particules à piéger. Lors de son utilisation répétée, le filtre s'encrasse ce qui réduit son efficacité. Une maintenance régulière avec changement des filtres est donc nécessaire.

b) Ionisation et filtration électrostatique

L'ionisation est la transformation d'un atome ou d'une molécule électriquement neutre en ion, par la perte ou le gain d'un ou plusieurs électrons. Le principe de l'ionisation est de précipiter les particules chargées de l'air soit sur les surfaces, par répulsion des particules de même charge sur les surfaces par attraction électrostatique, c'est l'ionisation simple, soit sur des électrodes portant une charge électrique opposée à celle des particules ionisées, c'est la précipitation électrostatique. Les particules de charges opposées peuvent également s'attirer et former des particules plus lourdes qui vont se déposer sur les surfaces plus rapidement.

Il existe plusieurs procédés permettant d'ioniser un atome ou une molécule. On distingue par exemple :

- l'ionisation par impact électronique : un faisceau d'électrons accélérés rencontre un atome ou une molécule et lui arrache lors du choc un ou plusieurs électrons,
- l'ionisation par l'action de rayonnements : un atome ou une molécule est soumis à l'action d'un rayonnement de longueur d'onde suffisamment énergétique pour éjecter un électron périphérique.

Les systèmes d'épuration utilisant le principe de l'ionisation utilisent le plus souvent des procédés d'ionisation par impact électronique, dont les deux techniques les plus couramment utilisées sont l'ionisation par décharge couronne (corona) et l'ionisation par décharge à barrière diélectrique (BDD).

Si les particules sont la cible principale de l'ionisation, une action sur les molécules gazeuses peut également être observée. Les interactions entre les composés organiques volatiles (COV) et des radicaux formés lors de la génération d'ions conduisent à une suite de réactions chimiques en chaîne qui doit conduire à une minéralisation lorsque la réaction est complète. C'est ce qui est recherché dans le plasma.

3.1.2. Les techniques d'oxydation ou destructrices

a) Le plasma

Le plasma est un état de la matière constitué d'un gaz ionisé. Le terme plasma désigne un gaz composé d'un mélange de particules neutres, d'ions positifs et d'électrons libres. La formation d'un

plasma est obtenue lorsqu'un gaz est soumis à un champ électrique de forte intensité, à un champ électromagnétique intense ou à des températures suffisamment élevées, ou lorsqu'il est bombardé par des particules. Il en résulte une ionisation du gaz. Lorsque celle-ci est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules, le gaz devient alors un fluide très conducteur appelé plasma.

Dans le domaine de l'épuration de l'air intérieur, c'est la technologie du plasma « froid » ou plasma non-thermique, c'est-à-dire lorsque la température moyenne du gaz est proche de la température initiale, qui est utilisée afin de générer des espèces actives, comme les radicaux libres, qui sont capables de décomposer par oxydation certains polluants présents dans l'air.

b) L'ozonation

Le principe de l'épuration de l'air par l'ozone repose sur l'émission dans l'air, d'ozone par des générateurs d'ozone ou ozoneurs.

La molécule d'ozone (O_3), très réactive et relativement instable, a une tendance naturelle à se décomposer en dioxygène (O_2) et oxygène atomique (O) qui vont réagir avec d'autres composés chimiques jusqu'à les décomposer. Cette capacité à céder facilement un atome d'oxygène lui confère un très fort pouvoir oxydant. La technique de l'épuration par ozonation repose sur cette propriété de l'ozone à pouvoir générer des réactions de décomposition.

c) La photocatalyse

Le principe de la photocatalyse repose sur la décomposition de molécules par une succession de réactions chimiques, jusqu'à la minéralisation, suite à l'activation d'un catalyseur par un rayonnement lumineux d'énergie suffisante.

Ainsi, de manière simplifiée, le principe de la photocatalyse repose sur un processus électronique qui se produit à la surface d'un catalyseur, qui est souvent du dioxyde de titane (TiO_2) du fait de son faible coût et de ses performances élevées. Lorsque que le catalyseur est soumis à un rayonnement d'intensité lumineuse suffisante, des charges se créent à la surface de celui-ci. Des réactions d'oxydo-réductions successives se produisent alors entre les molécules adsorbées sur le photocatalyseur et ces charges jusqu'à, en théorie, une minéralisation complète du polluant organique en eau et dioxyde de carbone (CO_2). Il se forme également des dérivés réactifs de l'oxygène (OH^\cdot , $O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 ...) qui contribuent à la dégradation des polluants organiques.

Remarque : le principe de la photocatalyse peut également être mis en œuvre dans des matériaux de construction ou de décoration comme des peintures, des carrelages, etc.

Nota bene : D'autres techniques d'épuration de l'air existent comme la filtration biologique ou les ultraviolets. La biofiltration repose sur la capacité de certains microorganismes à métaboliser les polluants. Elle n'est cependant pas encore mise en œuvre pour l'épuration de l'air intérieur. Les ultraviolets peuvent avoir une action germicide et une action photolytique sur les COV. Leur application commerciale porte aujourd'hui essentiellement sur l'élimination des aérosols microbiens, cependant cette technologie n'est recensée que dans peu de dispositifs et l'analyse de la littérature scientifique n'a pas permis d'identifier d'études les concernant dans des conditions d'utilisation se rapprochant de la réalité.

3.1.3. Les sprays revendiquant un assainissement ou une épuration de l'air

A l'occasion de l'expertise, des sprays ont également été identifiés qui revendiquent un assainissement de l'air intérieur. Deux types de produits ont été identifiés : les sprays à base d'huiles essentielles ou d'autres substances actives qui revendiquent souvent une action contre les biocontaminants de l'air intérieurs (bactéricides, virucides, fongicides, acaricides et insecticides), et

les désodorisants qui revendiquent une neutralisation des odeurs, au-delà du masquage, sans que le principe ne soit toutefois bien défini.

3.2. Conclusions du CES

□ Recensement des dispositifs d'épuration de l'air intérieur :

L'étude de marché conduite dans le cadre de cette expertise montre que le marché français est un marché émergent encore en pleine évolution, avec une offre croissante chez les fabricants d'électroménagers et chez les fabricants spécialisés dans le traitement de l'air.

Près de 500 dispositifs d'épuration d'air intérieur ont été recensés. Il s'agit majoritairement d'épurateurs d'air autonomes (64 %). Si ces derniers représentent le nombre de références le plus important, ils ne représentent cependant que 0,3 % des parts de marché (environ 7 000 ventes/an). Ces dispositifs autonomes coûtent en moyenne 315 €, mais avec une grande variabilité (moins de 50 € à plus de 2000 €), ce qui peut expliquer leur faible pénétration du marché par rapport à d'autres dispositifs moins coûteux tels que les sprays « assainissants », naturels ou de synthèse, dont le coût unitaire est en moyenne de 10 à 15 €. Ces derniers dominent d'ailleurs les parts de marché avec 62 % (plus de 22 millions de ventes/an), pour seulement 13 % des références recensées.

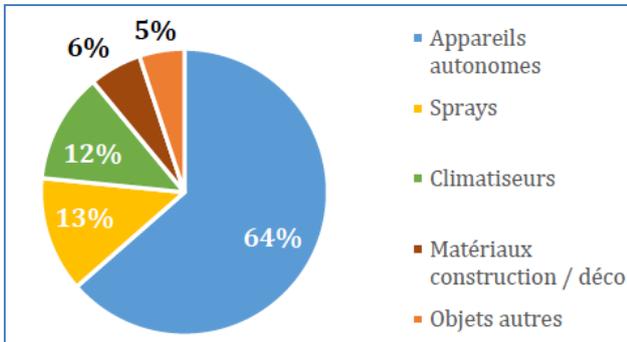
Les revendications d'efficacité sont assez hétérogènes et peuvent cibler une substance spécifique ou un mélange de polluants. Elles portent principalement sur les composés organiques volatils (COV) (75 %), les virus, bactéries et moisissures (68 %), les particules (58 %) et les allergènes (pollens, acariens) (54 %). Certaines concernent plus généralement la fumée de cigarette, les odeurs, ou « les polluants de l'air ».

Concernant les technologies d'épuration utilisées, il est important de noter que plus de la moitié des références combinent plusieurs technologies. Les plus présentes sur le marché sont la filtration mécanique (35 % des références), l'ionisation (33 % des références) et l'adsorption physique (24 % des références). Il est à noter que cette expertise a été initiée notamment suite à l'émergence de préoccupations sur la photocatalyse rapportées dans plusieurs travaux de recherche montrant des émissions de sous-produits. Cependant l'étude de marché montre que cette technologie est encore peu répandue : elle représente moins de 17 % des références.

Enfin, l'étude de marché a permis de mettre en évidence le fait que les technologies implémentées étaient souvent mal décrites sur les dispositifs d'épuration et que l'efficacité revendiquée était peu justifiée. Les fabricants, « prescripteurs » et associations de consommateurs auditionnés ont souligné l'importance de la mise en œuvre de normes permettant de justifier l'efficacité des produits. Par ailleurs, les « prescripteurs » indiquent être plus favorables à la prévention par l'élimination des sources de polluants qu'à une approche par épuration de l'air. Si un traitement de l'air s'avère nécessaire, à ce jour seule la filtration mécanique est perçue par ces prescripteurs comme étant « sans danger ». Il est important de souligner que si ces dispositifs ne sont pas entretenus, ils peuvent être à l'origine d'une détérioration de la qualité de l'air.

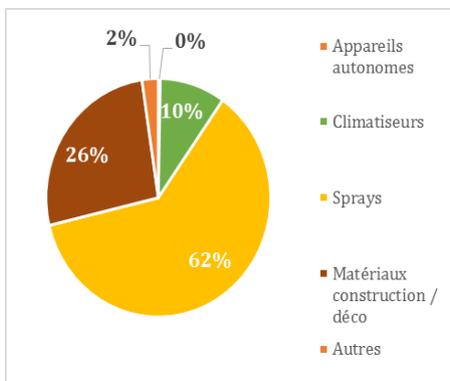
Les graphiques présentés ci-dessous, extraits de l'étude de marché, illustrent les éléments décrits ci-dessus.

Répartition des produits dans les 5 familles identifiées



Nombre de produits par famille	
Appareils autonomes	312
Sprays	64
Climatiseurs	61
Matériaux construction / déco	29
Objets autres	25
TOTAL	491

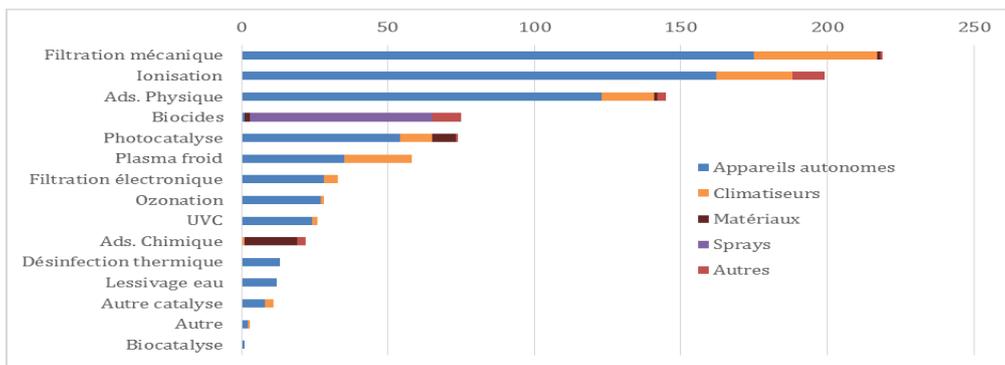
Parts de marché de l'épuration de l'air intérieur par famille de produits



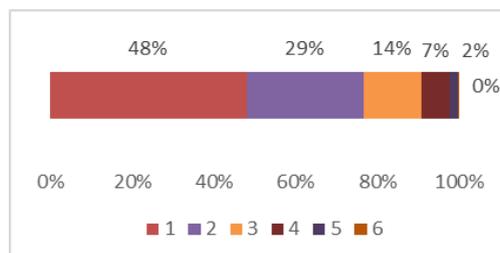
« Malgré la prépondérance d'appareils autonome dans l'offre, ce sont pourtant les sprays qui représentent la majeure partie de la valeur marchande (62%), les épurateurs autonomes ne comptant que pour 0,3% de la valeur de marché. Le marché de l'épuration de l'air intérieur est estimé à environ 170 millions d'euros par an au total, avec environ 26% relatifs aux matériaux de construction et décoration (les peintures occupant une place prépondérante), 10% issus des climatiseurs équipés de fonctions d'épuration et 2% des objets autres.

Les matériaux de construction et de décoration apparaissent encore peu diversifiés (29 référence identifiées en France), l'offre étant principalement constituée de peintures dépolluantes, plaques de plâtre, ainsi que d'un certain nombre de revêtements plus originaux (carrelage, dalles de plafond, toile à peindre, aérosol donnant aux surfaces des propriétés dépolluantes). Les « objets autres » sont également en faible nombre et nature extrêmement diverses (ionisateurs USB, désodorisants sous forme de gels, blocs...).

Nombre de références par technologie d'épuration utilisée :



Nombre de technologies utilisées par dispositif d'épuration :



□ **Réglementation et normalisation :**

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis d'identifier de réglementation propre à l'utilisation ou la mise sur le marché de systèmes d'épuration de l'air intérieur en France. A l'étranger, seul l'Etat de Californie (USA) réglemente les émissions d'ozone des dispositifs d'épuration d'air, qui ne doivent pas émettre plus de 0,05 ppm d'ozone.

S'il n'existe pas de réglementation contraignante encadrant les dispositifs d'épuration de l'air en France, trois normes, dont deux expérimentales⁵, permettent d'évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes (norme NF B44-200, également applicable aux climatiseurs), l'efficacité des systèmes photocatalytiques sur les COV (norme expérimentale XP B44-013), et d'évaluer les matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des oxydes d'azote (norme expérimentale XP B44-011). Il est important de noter que les essais conduits en laboratoire ne sont pas toujours représentatifs des conditions réelles d'utilisation.

Ces normes représentent un réel progrès car elles proposent des protocoles d'essais normalisés qui permettent de comparer les performances des différents dispositifs entre eux. Elles permettent d'évaluer l'efficacité des dispositifs mais également l'émission de certains produits secondaires. Cependant elles sont encore perfectibles car elles ne prévoient pas toutes ni d'essais en recirculation, ni d'essais de vieillissement. Or ces essais complémentaires permettraient de :

- de mettre en évidence la formation de sous-produits de réaction des polluants de l'air intérieur avec les émissions de l'épurateur (par exemple, l'interaction entre l'ozone et les terpènes conduit à la formation de particules),
- de mesurer l'éventuelle baisse de performance de l'appareil au cours du temps.

□ **Répercussions sur la qualité de l'air intérieur des dispositifs d'épuration de l'air :**

L'objectif de ces travaux d'expertise était d'étudier les effets de la mise en œuvre des dispositifs sur la qualité de l'air dans des conditions réelles ou proches de la réalité. Les études recensées sont peu nombreuses et ne permettent pas de démontrer une efficacité en conditions réelles d'utilisation.

Par ailleurs, ces dispositifs peuvent dégrader la qualité de l'air intérieur en générant de nouveaux polluants. Au vu de l'analyse de la littérature scientifique conduite, le CES note qu'il peut être observé :

- Des émissions primaires, intentionnelles ou non, liées au fonctionnement du dispositif (ex. : ozone émis par les ozonateurs, mais également par les plasmas),

⁵ Postérieurement à l'adoption des travaux d'expertise, ces deux normes expérimentales ont été remplacées ; les normes les ayant remplacées n'ont pas pu faire l'objet d'une évaluation :

- la norme expérimentale XP B44-13 de décembre 2009 (Méthode d'essais et d'analyses pour la mesure d'efficacité de systèmes photocatalytiques pour l'élimination des composés organiques volatils / odeurs dans l'air intérieur en recirculation) a été annulée et remplacée par la norme NF EN 16846-1 en juin 2017 (Photocatalyse – mesure de l'efficacité des dispositifs photocatalytiques servant à l'élimination, en mode actif, des COV et des odeurs dans l'air intérieur – partie 1 : méthode d'essai en enceinte confinée) ;
- la norme expérimentale XP B44-011 de décembre 2009 (Photocatalyse - Méthode d'essai pour l'évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx - Méthode à un seul passage en mode tangentiel) a été annulée et remplacée par la norme expérimentale XP CEN/TS 16980-1 en février 2017 (Photocatalyse - Méthodes d'essai en flux continu - Partie 1 : détermination de la dégradation du monoxyde d'azote (NO) dans l'air par des matériaux photocatalytiques).

- La formation de sous-produits liée à la dégradation incomplète des polluants (ex. : formation de formaldéhyde du fait d'une dégradation incomplète de l'éthanol par photocatalyse),
- La formation de polluants secondaires liée aux interactions entre les substances générées par l'épurateur et les polluants présents dans les environnements intérieurs (ex. : formation de particules secondaires du fait de réactions entre de l'ozone émis par un épurateur à plasma et des terpènes présents dans l'air intérieur),
- Des émissions secondaires liées aux interactions physiques, chimiques ou biologiques entre les polluants piégés dans l'épurateur et des polluants de l'air intérieur. (ex. : réactions de polluants de l'air intérieur avec de l'ozone piégé dans le filtre à charbon actif).

Les sprays « assainissants » contenant des huiles essentielles ou d'autres substances actives revendiquent une action biocide et sont par conséquent soumis au règlement européen (UE) n°528/2012 relatif à la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides. Ils doivent donc contenir des substances actives approuvées ou encore en cours d'examen au niveau européen. A terme, ils devront faire l'objet d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) qui sera basée sur la démonstration, d'une part de l'efficacité du produit contre les cibles revendiquées, et d'autre part d'un risque acceptable pour l'homme et l'environnement.

Considérant qu'ils feront dans les années à venir l'objet d'une évaluation dans le cadre de l'implémentation de ce règlement⁶, il n'a pas été conduit dans le cadre de cette expertise de recherche bibliographique approfondie ni sur l'efficacité biocide des huiles essentielles ou autres substances actives dispersées dans l'air intérieur, ni sur les effets sur la santé de l'inhalation des huiles essentielles notamment. L'expertise présente toutefois deux études récentes pointant des émissions de COV à des niveaux préoccupants.

Le CES relève qu'il existe à ce jour peu d'études sur les effets, bénéfiques ou délétères, sur la santé à court terme associés à l'utilisation d'épurateurs d'air, et qu'aucune étude sur les effets à long terme n'a été identifiée dans la littérature scientifique.

Par ailleurs, le CES note que l'utilisation de systèmes d'épuration d'air intérieur conçus pour le grand public pourrait ne pas être adaptée à une utilisation dans des ambiances professionnelles où la nature et le niveau de polluants peuvent être différents de ceux rencontrés dans les environnements intérieurs domestiques.

Le tableau 1 synthétise les principes, revendications d'efficacité et limites des principales techniques d'épuration relevées par l'analyse bibliographique.

⁶ Les produits dont les substances actives sont en cours d'examen ne sont pas encore soumis à AMM. Les produits dont les substances actives ont été approuvées sont d'ores et déjà soumis à AMM. La fin du programme d'examen des substances actives inscrites au programme d'examen des substances est prévue pour 2024.

Tableau 1 : principes, revendications d'efficacité et limites des principales techniques d'épuration relevées par l'analyse bibliographique.

Technique d'épuration	Principe	Revendications d'efficacité	Limites/inconvénients relevés par l'analyse de la littérature scientifique
Ionisation/filtration électrostatique	Injection d'ions dans l'air qui sont captés par les particules. Les particules chargées sont captées par les surfaces du bâtiment, ionisation simple, ou par des plaques électriquement chargées présentes au sein de l'épurateur dans le cas de la précipitation électrostatique.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Amélioration du bien-être 	<p>L'efficacité est peu démontrée en conditions réelles d'utilisation.</p> <p>Emissions potentielles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ozone → formation de particules secondaires en présence de terpènes • Espèces réactives de l'oxygène → réactions avec les polluants de l'air intérieur pouvant former des polluants secondaires
Ozonation	Oxydation des polluants par la décomposition de l'ozone	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des composés organiques ♦ Elimination des odeurs ♦ Elimination des micro-organismes 	<p>L'ozone peut être efficace sur les contaminants chimiques et biologiques, mais à des concentrations dans l'air qui peuvent avoir un impact sur la santé humaine. L'efficacité est faible aux concentrations d'ozone sans effet sur la santé humaine.</p> <p>La génération d'ozone entraîne des concentrations dans l'air supérieures à 100 µg.m-3 (valeur guide de l'OMS sur 8h dans l'air ambiant)</p> <p>Formation de polluants secondaires, ex :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Particules en présence de terpènes • Acide acétique en présence de formaldéhyde
Plasma froid	Minéralisation des molécules organiques au travers de réactions d'oxydation initiées par les radicaux libres produits dans un champ ionisant.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>Le plasma froid seul a de réelles capacités à minéraliser les polluants en CO₂ et O₂ en conditions expérimentales, mais en pratique, il est observé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une minéralisation incomplète → génération de polluants secondaires • L'émission d'ozone → formation de particules secondaires en présence de terpènes • L'émission d'oxydes d'azote
Plasma/catalyse	Synergie entre un plasma et une catalyse ou photocatalyse, permettant de limiter la génération de polluants secondaires (NO ₂ et O ₃).	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>Les mêmes limites que pour les plasmas froids « seuls » sont recensées, la formation de produits secondaires restant cependant moindre.</p>
Photocatalyse	Activation d'un catalyseur hétérogène par un rayonnement lumineux, souvent une lampe UV. Minéralisation des polluants.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>En théorie la photocatalyse aboutit à une minéralisation des polluants en CO₂ et O₂.</p> <p>En pratique la minéralisation est incomplète, ce qui engendre la formation de produits secondaires (ex : cétones, aldéhydes, acides organiques).</p>
Huiles essentielles contenues dans les sprays dits « assainissants »	Action biocide	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Eliminations des bio-contaminants ♦ Elimination des odeurs 	<p>L'efficacité n'a pas été recherchée dans la littérature.</p> <p>La principale limite est l'émission de COV dans l'air intérieur lors de l'utilisation de ces produits. Par ailleurs, la présence d'huiles essentielles dans l'air peut aggraver ou provoquer un asthme.</p>

3.3. Recommandations du CES

Considérant les résultats de l'expertise conduite, le CES émet les recommandations suivantes :

→ Mesures de prévention :

Le CES rappelle que pour prévenir des risques liés à une mauvaise qualité de l'air intérieur, il convient en premier lieu de :

- Limiter toutes les sources de pollution pouvant affecter la qualité de l'air intérieur;
- Ventiler et aérer.

→ Evaluation des différents dispositifs d'épuration de l'air :

Indépendamment de l'efficacité théorique d'une technologie donnée, ce sont les conditions effectives de sa mise en œuvre qui déterminent l'efficacité.

Dans ce contexte, afin d'assurer la sécurité des utilisateurs, le CES recommande la mise en place d'une certification de **chaque** dispositif qui revendique une épuration de l'air intérieur.

Les essais devront considérer :

- L'efficacité du dispositif à réduire le ou les polluant(s) visé(s),
- Les émissions de polluants liées au fonctionnement du dispositif,
- Les émissions de sous-produits, issues de la dégradation incomplète de polluants,
- Les réactions des émissions du dispositif avec des polluants présents dans l'environnement intérieur,
- Les effets du vieillissement du dispositif sur l'efficacité et l'émission de polluants et de sous-produits de dégradation.

Enfin, les essais devront être conduits dans les conditions les plus proches possibles de conditions d'utilisation du produit, dans différents environnements ciblés.

Le CES recommande que les allégations relatives à l'assainissement de l'air soient contrôlées/réglées. Les revendications d'assainissement doivent être précisées avec la liste des polluants ciblés.

Concernant le cas particulier des produits/substances pulvérisés afin d'assainir l'air intérieur, basés sur des propriétés biocides, l'évaluation de l'efficacité dans le cadre du règlement européen n°528/2012 relatif à la mise sur le marché de produits biocides, devra considérer l'efficacité de ces substances sur des micro-organismes aéropartés.

→ Information de la population sur l'utilisation de dispositifs d'épuration de l'air :

Le CES recommande d'informer la population des risques potentiels d'une dégradation de la qualité de l'air intérieur lors de l'utilisation de certains dispositifs d'épuration. L'attention sera attirée sur le fait que la dégradation de composés odorants, qui peuvent contribuer à la perception d'une mauvaise qualité de l'air, peut entraîner la formation de sous-produits non-odorants, mais qui peuvent être plus nocifs que les composés initiaux.

Le CES recommande que les utilisateurs soient informés de l'importance de respecter les instructions d'entretien des dispositifs d'épuration, afin de limiter les risques d'émissions de sous-produits.

Le CES recommande la mise en garde des sujets asthmatiques sur une possible aggravation de leur pathologie lors de la mise en œuvre de tels dispositifs, en particulier les dispositifs utilisant des huiles essentielles et les dispositifs pouvant générer de l'ozone.

→ **Amélioration des connaissances sur la pertinence de l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur :**

Le CES recommande la conduite d'études sur l'impact de l'utilisation d'épurateurs d'air sur la qualité de l'air intérieur en conditions réelles, et de s'assurer de l'absence d'effets néfastes sur la santé, en particuliers chez les sujets allergiques et/ou asthmatiques.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ».

Au regard des travaux d'expertise conduits, l'Anses souligne que d'une façon générale, **les éléments scientifiques collectés et analysés ne permettent pas de démontrer une efficacité en conditions réelles d'utilisation des dispositifs d'épuration de l'air intérieur.**

Outre les recommandations formulées par son CES, l'Anses identifie deux points de vigilance particuliers :

- ♦ La question de l'émission de nanoparticules par certains dispositifs d'épuration de l'air, notamment ceux utilisant la photocatalyse, s'est posée à plusieurs reprises lors de l'instruction de ces travaux. Deux études publiées dans la littérature scientifique ont recherché des nanoparticules dans l'air sans cependant en identifier. Toutefois, les résultats récents du projet de recherche IMP-AIR - « Impact des matériaux photocatalytiques sur la qualité de l'air des environnements intérieurs» (CSTB, CEA) financé par le programme PRIMEQUAL, soulignent que l'abrasion des surfaces nano-additivées des matériaux photocatalytiques peut produire des particules nanométriques, sans qu'aucune conclusion sanitaire ne puisse être tirée à ce stade. Des recherches complémentaires sur l'émission de nanoparticules dans l'air par les matériaux photocatalytiques, notamment lors de leur vieillissement, sont à conduire, ainsi que l'étude de leur innocuité.
- ♦ Concernant les sprays dits « assainissants » qui revendiquent une action biocide, et compte tenu des signaux recueillis à l'occasion de cette expertise, l'Anses recommande lors de l'évaluation de ces produits dans le cadre du processus d'AMM biocides, de porter une attention particulière aux données scientifiques relatives aux effets sanitaires liés à l'inhalation de composés organiques volatils (COV), naturels ou de synthèse, émis par ces sprays. En effet, plusieurs des COV émis par ces dispositifs peuvent avoir des effets néfastes sur la santé.

Au-delà, compte tenu des informations recueillies, de tels sprays ne devraient pas être utilisés par des personnes asthmatiques.

L'Anses rappelle que le plan de qualité de l'air intérieur repris dans le Plan national santé environnement n°3 (2015-2019) recommande de travailler sur l'information et l'étiquetage pour les produits de consommation les plus émetteurs en polluants volatils tels que les produits désodorisants et produits d'entretien.

Enfin, de manière plus globale, l'agence souligne la nécessité de conduire des travaux d'étude sur l'impact sanitaire lié à l'usage d'huiles essentielles qui peuvent se retrouver dans de multiples produits de consommation courante.

Dr Roger Genet

MOTS-CLÉS

Épuration de l'air, purification de l'air, qualité de l'air, pollution de l'air, air intérieur, composés organiques volatils, biocontaminants, photocatalyse, ionisation, ozonation, plasma

Air purification, air cleaning, air quality, air pollution, indoor air, volatile organic compounds, bio-contaminants, photo-catalysis, ionization, plasma

RÉFÉRENCES

US-EPA. 1991. Building air quality. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Annexe - Suivi des actualisations de l'avis

Date	Page	Description de la modification
19/09/2017	9	Ajout d'une note de bas de page (n°5) dans le second paragraphe, indiquant que deux normes ont été annulées, postérieurement à l'adoption des travaux, et remplacées par deux nouvelles normes européennes.

Epuration de l'air intérieur

Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes

Auto-saisine « 2012-SA-0236 – Epurateurs d'air intérieur »

RAPPORT d'expertise collective

comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »

Janvier 2017

Mots clés

Epuration de l'air, purification de l'air, qualité de l'air, pollution de l'air, air intérieur, composés organiques volatils, biocontaminants, photocatalyse, ionisation, ozonation, plasma

Air purification, air cleaning, air quality, air pollution, indoor air, volatile organic compounds, biocontaminants, photo-catalysis, ionization, plasma

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

EXPERTS RAPPORTEURS

M. Jean-Louis FANLO – Professeur, Directeur adjoint du Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel, Responsable de l'équipe Odeurs et COV (Ecoles des Mines d'Alès) – Spécialité : génie des procédés

M. Fabien GERARDIN – Ingénieur, responsable d'étude (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Spécialités : génie des procédés, procédés photochimiques.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants, air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- Evaluation des risques liés aux milieux aériens – 25 octobre 2012, 15 mai 2014, 18 septembre 2014, 11 juin 2015, 4 février 2016, 14 avril 2016, 30 juin 2016, 8 septembre 2016, 17 novembre 2016 et 16 décembre 2016.

Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 IRSET – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, Santé au Travail.

Vice-présidente

Mme Séverine KIRCHNER – Directrice adjointe de la Direction santé confort (Centre scientifique et technique du bâtiment), coordinatrice de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur, expologie.

Membres

M. Gille AYZOZ – Chef de service qualité de l'air (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) - Spécialités : physico-chimie de l'atmosphère, rejets atmosphériques. (démission le 24 mars 2016)

Mme Armelle BAEZA – Professeur des universités (Université Paris Diderot) – Spécialité : toxicologie.

M. Claude BEAUBESTRE – Chef de département des Activités scientifiques transversales (Service Parisien de Santé Environnementale) - Spécialités : pollution de l'air intérieur, microbiologie.

M. Olivier BLANCHARD – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Patrick BROCHARD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université Bordeaux II – Centre hospitalier universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine du travail, évaluation des risques sanitaires, agents polluants. (démission le 15 novembre 2016)

M. Denis CHARPIN – Professeur des universités, praticien hospitalier (Aix Marseille Université) – Spécialités : médecine, agents polluants et allergènes, épidémiologie des risques liés à l'environnement.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : Santé travail, pneumologie.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Lille) – Spécialités : Ecologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Muriel ISMERT – Responsable unité impact sanitaire et exposition (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : écotoxicologie, évaluation des risques sanitaires, qualité de l'air intérieur. (démission le 26 novembre 2014)

M. Eddy LANGLOIS – Ingénieur, responsable de laboratoire (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie des polluants, air des lieux de travail (santé travail), surveillance et méthodes d'analyse.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen) – Spécialités : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Docent & Maître d'Enseignement et de Recherche à l'Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants, air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail.

Mme Mathilde PASCAL – Chargée de projets (Institut de veille sanitaire) – Spécialités : épidémiologie, santé environnement, air et climat. (démission le 2 janvier 2017).

M. RIVIERE Emmanuel – Directeur délégué (ATMO Grand Est). Compétences : Métrologie, méthodes d'analyse et de surveillance, air ambiant et intérieur, modélisation des émissions, évaluation de l'exposition.

Mme Sandrine ROUSSEL – Ingénieur hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Besançon) – Spécialités : microbiologie, pathologies respiratoires et allergiques, microorganisme de l'environnement.

M. Rémy SLAMA – Directeur de recherche (Inserm, Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Epidémiologie environnementale, reproduction et fertilité, santé des enfants, pollution atmosphérique, milieux aériens et environnement, perturbateurs endocriniens.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Audrey MALRAT-DOMENGE – Direction de l'évaluation des risques, Anses

Contribution scientifique

Mme Marion KEIRSBULCK – Direction de l'évaluation des risques, Anses

Mme Audrey MALRAT-DOMENGE – Direction de l'évaluation des risques, Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Direction de l'évaluation des risques, Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Nouvel Hôpital Civil de Strasbourg – Pôle de pathologie thoracique

Professeur Frédéric DE BLAY – Pneumo-allergologue - Chef de Pôle

Mme Martine OTT – Conseillère médicale en environnement intérieur

UFC Que Choisir

M. Eric BONNEFF – Directeur du service des Essais comparatifs

Mme Mélanie MARCHAIS - Rédactrice technique dans les domaines de la chimie domestique et de l'environnement

CONTRIBUTION EXTÉRIEURE AU COLLECTIF

Etude de marché sur les techniques d'épuration de l'air intérieur à destination du grand public ou des professionnels. - Nomadéis en collaboration avec ULR Valor – Mai 2015 – Marché n°14MP029.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	11
Liste des tableaux.....	13
Liste des figures	13
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	15
1.1 Contexte.....	15
1.2 Objet de la saisine.....	16
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	16
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts	16
2 Champ et méthode d'expertise	17
2.1 Champ de l'expertise	17
2.2 Méthode d'expertise.....	18
2.2.1 Revue de la littérature scientifique	18
2.2.2 Etude de marché	18
2.2.3 Conduite d'auditions.....	19
3 Quelques repères sur la pollution de l'air intérieur.....	20
3.1 Sources.....	21
3.2 Polluants d'intérêt, pathologies associées	21
3.3 Politiques publiques et réglementation.....	24
3.3.1 Prévention, limitation des sources et surveillance.....	24
3.3.2 Aération et ventilation.....	25
4 Recensement des dispositifs « épurateurs d'air » et estimation de leur part de marché en France	27
4.1 Description du marché.....	27
4.2 Focus sur les technologies d'épuration et les polluants ciblés	30
4.2.1 Technologies d'épuration recensées.....	30
4.2.2 Polluants traités	32
5 Description des différentes techniques/principes d'épuration mises en œuvre par les dispositifs recensés.....	35
5.1 Les techniques de piégeage.....	35
5.1.1 Filtration mécanique	35
5.1.1.1 Principe et utilisation de la filtration	35
5.1.1.2 Mécanismes de capture des particules	35

5.1.1.3	Efficacité de filtration	37
5.1.1.4	Caractéristiques des médias filtrants.....	38
5.1.1.4.1	<i>Matériaux</i>	38
5.1.1.4.2	<i>Types de filtres</i>	38
5.1.2	Ionisation et filtration électrostatique.....	40
5.1.2.1	Généralités.....	40
5.1.2.2	L'ionisation simple ou ionisation négative	41
5.1.2.3	La précipitation électrostatique.....	42
5.2	Techniques d'oxydation / destructrices	42
5.2.1	Plasma	42
5.2.2	Ozonation	43
5.2.3	Filtration biologique.....	44
5.2.3.1	Le procédé	44
5.2.3.2	Paramètres opératoires.....	45
5.2.3.2.1	<i>Le matériau de garnissage</i>	45
5.2.3.2.2	<i>Paramètres physico-chimiques</i>	46
5.2.3.3	Bilan	46
5.2.4	Catalyse/photocatalyse.....	47
5.2.4.1	Photocatalyse.....	47
5.2.4.1.1	<i>Généralités</i>	47
5.2.4.1.2	<i>Principe</i>	48
5.2.4.1.3	<i>Mécanisme photocatalytique (Cloteaux 2015)</i>	49
5.2.4.1.4	<i>Applications commerciales</i>	50
5.3	UV.....	51
5.3.1	Principe du traitement de l'air par photochimie.....	51
5.3.1.1	Généralités.....	51
5.3.1.2	Applications germicides des UV	51
5.3.1.3	Propriétés photolytiques des UV	51
5.3.2	Applications.....	52
5.4	Réglementation relative aux dispositifs d'épuration de l'air intérieur.....	53
5.4.1	En France.....	53
5.4.2	A l'international	53
5.5	Normes.....	53
5.5.1	Normes françaises	53
5.5.2	Normes à l'étranger.....	55
5.6	Méthodes d'essais non normalisées / Labels	56
5.6.1	Air intérieur contrôlé de l'association de recherche clinique en allergologie et asthmologie (ARCAA 2016)	56
5.6.1.1	Missions de l'ARCAA	56
5.6.1.2	Critères de labélisation.....	57
5.6.2	ECARF (European Centre for allergy Research Foundation).....	57
5.6.2.1	Missions de l'ECARF (ECARF 2016c)	57
5.6.2.2	Critères de labélisation d'un épurateur d'air (ECARF 2016a).....	58
5.6.3	AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers).....	58
5.6.3.1	Missions de l'AHAM (AHAM 2016).....	58
5.6.3.2	Critères de labélisation d'un épurateur d'air (AHAM 2014)	59
6	Evolution de la qualité de l'air intérieur associée à l'utilisation de dispositifs d'épuration d'air	60

6.1	Techniques de piégeage.....	60
6.1.1	Ionisation simple / filtration électrostatique (ou électronique)	60
6.1.1.1	Effets sur la perception de la qualité de l'air et la santé	61
6.1.1.2	Effets sur les polluants chimiques et les particules	63
6.1.1.3	Effets sur les polluants biologiques	69
6.1.1.4	Conclusions.....	71
6.2	Techniques destructrices	72
6.2.1	Ozonation	72
6.2.2	Plasma	74
6.2.2.1	Effets sur la perception de la qualité de l'air	74
6.2.2.2	Effets sur les polluants chimiques et les particules	77
6.2.2.3	Effets sur les polluants biologiques	82
6.2.2.4	Conclusions.....	83
6.2.3	Plasma-catalyse	84
6.2.4	Photocatalyse	87
6.2.4.1	Dispositifs passifs.....	88
6.2.4.1.1	<i>Effets sur la perception de la qualité de l'air.....</i>	<i>88</i>
6.2.4.1.2	<i>Effets sur les polluants chimiques</i>	<i>90</i>
6.2.4.1.3	<i>Conclusions.....</i>	<i>92</i>
6.2.4.1	Dispositifs actifs – épurateurs autonomes	93
6.2.4.1.1	<i>Effets sur la perception de la qualité de l'air.....</i>	<i>93</i>
6.2.4.1.2	<i>Effets sur les polluants organiques.....</i>	<i>97</i>
6.2.4.1.3	<i>Effets sur les polluants biologiques</i>	<i>104</i>
6.2.4.1.4	<i>Conclusions.....</i>	<i>105</i>
7	Cas particulier des sprays revendiquant un assainissement ou une épuration de l'air.....	108
7.1	Principe.....	108
7.2	Point de réglementation sur les produits biocides.....	108
7.3	Evolution de la qualité de l'air liée à l'utilisation de sprays dits « assainissants »	110
7.3.1	Essais « UFC que choisir » (Chesnais et Marchais 2014)	110
7.3.2	Essais de Delmas et al. (2016).....	111
7.4	Conclusions.....	113
8	Conclusion	115
8.1	Recensement des dispositifs d'épuration de l'air intérieur.....	115
8.2	Réglementation et normalisation	116
8.3	Répercussions sur la qualité de l'air intérieur de ces dispositifs.....	116
9	Recommandations	119
9.1	Mesures de prévention	119
9.2	Evaluation des différents dispositifs d'épuration de l'air.....	119
9.3	Information de la population sur l'utilisation de dispositifs d'épuration de l'air	119
9.4	Amélioration des connaissances sur la pertinence de l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur	120

ANNEXES	129
Annexe 1 : Auto-saisine	130
Annexe 2 : Objet et méthodologie de l'étude de marché	132
Annexe 3 : Compte-rendu de l'audition de UFC Que Choisir, du (10/02/2015)	142
Annexe 4 : Compte-rendu de l'audition du Professeur De Blay et de Madame Ott, du (27/03/2015).....	145
Annexe 5 : Aspects réglementaires relatifs à la qualité de l'air intérieur.....	147

Sigles et abréviations

Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AHAM : Association of home appliance manufacturers

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ANSI : American national standards institute

ARCAA : Association de recherche clinique en allergologie et asthmologie

ASHRAE : American society of heating, refrigerating and air-Conditioning engineers

BBC : Bâtiment basse consommation

Cal EPA : California environmental protection agency

CADR : Clean air delivery rate (débit d'air épuré)

CARB : California air resources board

CES : Comité d'air spécialisé

CETIAT : Centre technique des industries aérauliques et thermiques

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CNL : Campagne Nationale Logements

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composé organique volatil

COVt : Composés organiques volatils totaux

CTA : Centrale de traitement d'air

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation

DBD : Décharge à barrière diélectrique

DEP : Débit expiratoire de pointe

ECARF : European centre for allergy research foundation

EDF : Electricité de France

ERP : Etablissement recevant du public

ESP : filtre électrostatique

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

HEPA : High Efficiency Particulate Air

HVAC : Heating, ventilation and air-conditioning

INPES : Institut national de prévention et d'éducation pour la santé

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

JEM : Japan Electrical Machinery Association Standard

LEPTIAB : Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment

LHVP : Laboratoire d'hygiène de la Ville de Paris
MPPS : Most penetrating particle size
NH₃ : ammoniac
NO : Monoxyde d'azote
NO₂ : Dioxyde d'azote
NO_x : Oxydes d'azote
O₂ : Dioxygène
O₃ : Ozone
OMS : Organisation mondiale de la santé
OQAI : Observatoire de la qualité de l'air intérieur
PCE : tTtrachloroéthylène
PM : Particulate matter
PNSE : Plan national santé environnement
SBM : Syndrome des bâtiments malsains
SYFAL : Syndicat français des allergologues
TCE : Trichloroéthylène
TiO₂ : Dioxyde de titane
UERA : Unité d'évaluation des risques liés à l'air
US-EPA : United States environmental protection agency
UV : Ultraviolet
VGAI : Valeur guide de l'air intérieur
VLCT : Valeur limite de courte durée
VLEP : Valeur limite d'exposition professionnelle
VMC : Ventilation mécanique contrôlée

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux polluants de l'air intérieur et leurs effets sur la santé	22
Tableau 2 : Classification des filtres	39
Tableau 3 : Impact des générateurs d'ions sur la perception de la qualité de l'air (Siegel <i>et al.</i> 2008)	61
Tableau 4 : Débits d'air, débits d'air épuré de la première phase de l'étude de Waring, Siegel, et Corsi (2008)	65
Tableau 5 : Emissions d'O ₃ , concentrations prévisionnelles (C*) dans des volumes de 50 et 392 m ³ (Waring, Siegel, et Corsi 2008)	66
Tableau 6 : Résumé des résultats de l'étude de Fletcher et Van Der Graaf (2011)	69
Tableau 7 : Synthèse des résultats de l'étude Cal-EPA (2006)	73
Tableau 8 : Abattements de COV et sous-produits observés à partir de la revue de Bahri et Haghghat (2014)	80
Tableau 9 : Abattements de COV et sous-produits observés à partir de la revue de Bahri et Haghghat (2014)	85
Tableau 10 : Résultats de l'étude de Kolarik et Toftum (2012)	89
Tableau 11 : Perception de la qualité de l'air suite à l'utilisation de prototypes d'épurateurs photocatalytiques (Kolarik <i>et al.</i> 2010, Kolarik et Wargocki 2010)	94
Tableau 12 : Produits intermédiaires issus de la photocatalyse des COV recensés dans la revue de Mo <i>et al.</i> (2009)	97
Tableau 13 : résumé des tests contrôles et photocatalytiques des neufs épurateurs (Costarramone <i>et al.</i> 2015)	98
Tableau 14 : CADR pour les COV aux concentrations initiales de 1000 et 250 ppbV de chaque polluant (acétaldéhyde, toluène, acétone, n-heptane et COV totaux) (Costarramone <i>et al.</i> 2015)	100
Tableau 15 : Principales caractéristiques des appareils testés telles que fournies par les fabricants et résultats des tests d'émissions d'ozone et de NO _x . (Tokarek <i>et al.</i> 2011)	101
Tableau 16 : Synthèse des résultats des essais de la phase 2 pour 1 épurateur d'air autonome en terme d'évolution des concentrations en polluants (d'après Tokarek <i>et al.</i> (2011)).	102
Tableau 17: mesure de la quantité moyenne de limonène dans 1 et 4 pulvérisations et calcul théorique de la concentration dans la cabine de 9 m ³ (procédure n°1)	112
Tableau 18 : Synthèse des limites des principales techniques d'épuration relevées par l'analyse bibliographique	118

Liste des figures

Figure 1 : Représentation de l'analyse globale du marché de l'épuration de l'air intérieur estimé à environ 170 473 000 € dans cette étude en fonction de la part du marché (exprimé en %)	28
Figure 2 : Caractéristiques principales du réseau de fabrication et de distribution des produits d'épuration d'air intérieur commercialisés en France	29
Figure 3 : Technologies les plus utilisées par les produits mobilisant une seule technique d'épuration	31

Figure 4 : Associations et nombre de technologies les plus rencontrées	31
Figure 5 : Pourcentage de dispositifs d'épuration en fonction du nombre de technologies.....	31
Figure 6 : Nombre de dispositifs par technologies d'épuration utilisées	32
Figure 7 : Polluants traités par les différentes familles de produits recensés et nombre de références par polluant et type de produits.....	34
Figure 8 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet de diffusion.....	36
Figure 9 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet d'interception.....	36
Figure 10 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet d'inertie.....	36
Figure 11 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet tamisage	37
Figure 12 : Efficacités pour chaque mécanisme de capture et totale - Adapté de (Bailly, Clerc-Renaud, et Rutman 2001)	38
Figure 13 : Configuration classique d'une DBD.....	40
Figure 14 : Configurations géométriques propices à la formation d'une décharge couronne.....	41
Figure 15 : Exemple de précipitateur électrostatique utilisé en unité de gaine (Ribot <i>et al.</i> 2006)	42
Figure 16 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un biofiltre et les principaux mécanismes impliqués dans la biofiltration (P1, Pn : sous-produits et intermédiaires de réaction. Sx : autre substrat (provenant du support organique, de la matrice EPS ou de la mort cellulaire). D'après Deshusses (1997) et Fanlo (1998)	45
Figure 17 : Applications possibles de la photocatalyse (source : Fédération française de la photocatalyse)	48
Figure 18 : Les différentes étapes d'une réaction de catalyse hétérogène (Cloteaux 2015).....	49
Figure 19 : Schéma simplifié du mécanisme photocatalytique avec du TiO ₂	50

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique en France et dans de nombreux pays. En effet, l'environnement intérieur offre une grande diversité de situations d'exposition à de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, dont les conséquences sur la santé sont variables. Différentes sources peuvent être à l'origine de la présence de polluants dans l'air intérieur : des sources propres au bâti, à son environnement, à ses équipements ou aux comportements de ses occupants.

Afin de réduire l'exposition à ces polluants de l'air intérieur, il est généralement conseillé de limiter les sources, d'aérer et de ventiler. Le contexte énergétique actuel est marqué par un renforcement de l'isolation des bâtiments et un taux de renouvellement d'air de plus en plus maîtrisé. Dans ce cadre, les systèmes d'épuration d'air commercialisés pour le grand public pourraient représenter une alternative pour améliorer la qualité de l'air intérieur.

Si cette alternative peut représenter une solution séduisante, les systèmes actuels n'ont pas toujours prouvé leur efficacité et leur innocuité. En effet, peu de données chiffrées sont disponibles pour juger de l'efficacité d'épuration de ces appareils, dont les technologies peuvent mettre en œuvre des filtres à particules, une ionisation, des charbons actifs, la photocatalyse ou du plasma froid. Trois normes ont été publiées sur des méthodes d'essais qui permettent d'évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air (efficacité d'épuration vis-à-vis de polluants, calcul du débit d'air épuré, mesure de la puissance acoustique) (normes XP B44-011, XP B44-013 (2009) et norme NF B44-200 (2016)).

Dans ce contexte, les résultats d'études menées par l'INRS et un consortium scientifique (CETIAT, LHVP, EDF, LEPTIAB, Hôpitaux universitaires de Strasbourg, Tera Environnement) (Ribot *et al.* 2006) ont été présentés au comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » en septembre 2011 comme sujet émergent. Ces résultats ont mis en évidence que les dispositifs d'épuration de l'air mettant en œuvre le principe de la photocatalyse, présentent une efficacité variable, parfois faible, et peuvent être responsables de l'apparition de sous-produits réactionnels potentiellement dangereux. Ces résultats concernent des épurateurs d'air photocatalytiques autonomes commercialisés pour le grand public mais également des appareils photocatalytiques distribués en milieux industriels.

Parallèlement, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), en partenariat avec l'université de La Rochelle, a organisé un atelier scientifique le 2 avril 2012 sur l'état des connaissances scientifiques relatives à l'efficacité et l'innocuité des procédés utilisant la photocatalyse dans les environnements intérieurs et les perspectives de développement de ces procédés. Cette journée a réuni les spécialistes du domaine. Les conclusions de cet atelier ont été restituées lors d'une réunion publique le 25 juin 2012 : Comme les travaux cités précédemment, les conclusions montraient que si le principe de la photocatalyse présente une efficacité potentielle sur de nombreux polluants de l'air intérieur, il a surtout de nombreux inconvénients. En effet, les systèmes et les matériaux photocatalytiques ne sont pas optimisés pour un usage dans les lieux de vie, l'efficacité n'est pas systématiquement démontrée pour l'air intérieur, notamment en conditions réelles d'utilisation et il n'existe pas de certification des produits commercialisés. De plus, les risques liés à l'émission de sous-produits potentiellement nocifs, ainsi que les risques inconnus liés à l'utilisation de certains agent photocatalytiques comme les nanoparticules de dioxyde de titane ont également été soulignés (OQAI 2012).

Dans ce contexte, le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » a pointé l'importance de travailler sur cette problématique et a encouragé l'Anses à s'autosaisir sur le sujet (Annexe 1).

1.2 Objet de la saisine

L'Anses s'est auto-saisie le 10 octobre 2012, afin d'identifier et analyser les différentes techniques de traitement d'air ou d'épuration de l'air et leurs émissions de substances afin d'évaluer l'innocuité liée à l'utilisation de ces traitements assorti éventuellement de préconisations d'usage. L'auto-saisine se structure autour des deux axes de travail suivants :

1. **Recenser les techniques d'épuration d'air** utilisées en environnement intérieur pour le grand public et pour de petites unités volumétriques ou en traitement d'appoint en milieu professionnel¹ (caractéristiques techniques, modalités de mise en œuvre, processus d'élimination, efficacité revendiquée, spectre d'activité pour les substances chimiques, particules, agents biologiques, etc.) ;
2. **Rassembler et analyser les connaissances disponibles** sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation des nouvelles techniques d'épuration d'air, notamment en présence de mélanges de polluants (polluants traités, non traités et secondaires) et en fonction de la mise en œuvre des dispositifs. Il ne s'agira pas d'évaluer l'efficacité des différents dispositifs disponibles sur le marché. Les techniques reposant sur la filtration, ne sont pas couvertes.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette auto-saisine et a nommé trois rapporteurs *intuitu personae* pour appuyer l'unité d'évaluation des risques liés à l'air (UERA) dans la réalisation de ces travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) »

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

¹ Les dispositifs utilisés en milieu industriel ; et les systèmes d'épuration d'air intégrés aux systèmes de ventilation des bâtiments collectifs, sont exclus du champ de la saisine.

2 Champ et méthode d'expertise

2.1 Champ de l'expertise

Initialement, le choix avait été fait de se focaliser sur les techniques dites émergentes (photocatalyse, ionisation...) et de ne pas considérer les techniques basées sur la filtration (filtre HEPA, filtre à charbon actif...) car ces dernières étaient plus classiques, utilisées depuis longtemps dans de nombreux domaines, et mieux connues en termes de polluants traités et polluants émis lors de l'utilisation. Cependant, à l'occasion de la recherche bibliographique conduite, il est apparu que les nouvelles techniques d'épuration d'air pouvaient être associées à des techniques plus classiques de filtration. Afin d'avoir une vue la plus exhaustive possible des dispositifs d'épuration de l'air intérieur disponibles sur le marché français, les dispositifs reposant sur des techniques de filtration ont alors été inclus dans le recensement des dispositifs commercialisés.

L'expertise couvre les dispositifs à destination du grand public, ou utilisés en traitement d'appoint en milieu professionnel. Les centrales de traitement de l'air (CTA) et les dispositifs pouvant être installés sur des systèmes de climatisation, ventilation et chauffage (CVC) ont été exclus du périmètre de l'expertise. Cependant, les climatiseurs pouvant être installés par des particuliers (monobloc ou split) qui revendiquent une épuration de l'air sont inclus dans le champ de la saisine.

L'autosaisine cible les dispositifs qui revendiquent une épuration de l'air intérieur, de ce fait les produits qui masquent les odeurs par le biais de diffusions de parfums sont exclus. Les diffuseurs et sprays qui revendiquent une « neutralisation » des odeurs avec une amélioration de la qualité de l'air sont eux inclus dans le champ de l'expertise.

Enfin, certains végétaux sont commercialisés avec comme argument de vente leur vertu dépolluante de l'air intérieur. Ces végétaux ont déjà fait l'objet d'études notamment par l'OQAI et l'Ademe. L'OQAI, en partenariat avec la faculté de pharmacie de Lille et l'Ademe, a également organisé un séminaire le 6 mai 2010 afin de faire le point sur l'état des connaissances sur les végétaux dits dépolluants. Les conclusions de cette journée sont résumées dans le bulletin de l'OQAI de juin 2010. Si certains végétaux ont prouvé leur capacité d'épuration en laboratoire, il n'y a pas d'efficacité réelle démontrée en conditions réelles. En outre, si les impacts sanitaires restent faibles, les végétaux présents dans les logements peuvent présenter une certaine toxicité et être à l'origine de troubles allergiques, soit directement liés aux plantes, comme le ficus par exemple, soit du fait de développement de moisissures dans le substrat de celles-ci (OQAI 2010). L'Ademe, dans le cadre du programme PHYTAIR², qui a émis un avis en septembre 2011, concluant notamment que l'argument « plantes dépolluantes » n'était pas validé scientifiquement au regard des niveaux de pollution généralement rencontrés dans les habitations, et des nouvelles connaissances scientifiques dans le domaine (Ademe 2011). Ces végétaux ne seront donc pas considérés de nouveau dans le cadre de cette expertise.

² Le programme de recherche PHYTAIR est né en 2004 sous l'impulsion du CSTB, du LSVF de la Faculté de Pharmacie de Lille et de l'Association Plant'Air Pur, afin d'étudier les capacités d'épuration des polluants par les plantes via leurs feuilles de façon passive, sans dispositif de biofiltration ; d'étudier les mécanismes biologiques impliqués dans l'épuration ; d'étudier le potentiel d'utilisation des plantes dans la biosurveillance de l'air intérieur par les plantes. Il a été soutenu financièrement par l'ADEME, les Conseils Régionaux du Nord-Pas de Calais et des Pays de Loire, le CSTB de Nantes et les fonds FEDER.

2.2 Méthode d'expertise

2.2.1 Revue de la littérature scientifique

La revue de la littérature réalisée dans le cadre de ces travaux d'expertise a pour objectif de faire un état des connaissances sur l'évolution de la qualité de l'air intérieur associée à l'utilisation des dispositifs d'épuration de l'air intérieur.

Des requêtes ont été formulées dans la base de données bibliographique Scopus pour la période 2008 à 2016 avec les groupes de mots clés suivants :

- *Indoor air*
- *purification OR treatment OR cleaning OR filtration OR cleaner OR purifier OR filter*

Un tri a été réalisé en analysant les titres et les résumés de plus de 2300 publications répertoriées afin d'éliminer dans un premier temps les publications qui n'entrent pas dans le champ de l'expertise (classées « hors sujet »). Cette approche a reposé principalement sur l'exclusion des articles portant sur l'efficacité énergétique, les systèmes centralisés de type HVAC³ ou les dispositifs à intégrer dans des gaines de ventilation (systèmes dits « in duct »), sur la recherche et le développement de techniques d'épuration et de nouveaux matériaux au stade expérimental, et sur des locaux particuliers (ex. salle propre - clean room, bâtiments agricoles).

Près de 90% des publications ont ainsi été classées « hors sujet » amenant une base d'environ 200 articles originaux à analyser. Ces articles fournissent en particulier des éléments sur :

- un descriptif et une discussion des technologies d'épuration d'air,
- des résultats de mesures sur site,
- les polluants d'intérêt.

Les publications relatives à des essais réalisés en conditions réelles ou comparables aux conditions réelles avec des appareils commercialisés ont été privilégiées. Par conditions réelles ou proches de la réalité, il est entendu des essais réalisés dans des locaux d'habitation ou dans des « grandes » chambres d'essais, avec un polluant ou un mélange de polluants dans des concentrations « proches » des concentrations rencontrées dans les environnements intérieurs tels que les logements. Par conséquent, les références traitant de tests d'efficacité expérimentaux et de modélisation à la fois au niveau de l'efficacité ou des concentrations ont été *a priori* écartées du champ de ce travail d'analyse bibliographique, sauf si ces essais étaient réalisés dans des conditions proches de conditions réelles.

2.2.2 Etude de marché

Pour répondre à la première question liée au recensement des techniques d'épuration, les experts rapporteurs et le CES ont préconisé la réalisation d'une étude de marché sur les dispositifs d'épuration en France. Un appel d'offre a été publié par l'Anses au mois d'août 2014 pour la réalisation d'une telle étude.

³ Le terme HVAC (Heating, ventilation, air conditioning), usuellement utilisé au niveau mondial, fait référence à des systèmes regroupant les équipements nécessaires pour le chauffage, la ventilation et la climatisation à l'échelle d'un bâtiment : chaudières/chaufferies, refroidisseurs, centrales de traitement d'air, ventilateurs d'extraction, filtres, conduits (EPA, 1991). Mais tous les systèmes HVAC ne sont pas conçus pour répondre à ces 3 fonctions. Une diversité de systèmes HVAC est soulignée et peut être représentée par un appareil autonome jusqu'à des systèmes centralisés desservant de multiples zones (EPA, 1991).

Le bureau d'étude Nomadéis, en partenariat avec l'ULR-Valor, a été retenu. Nomadéis est un cabinet de conseil indépendant, spécialisé en développement durable et ULR-Valor est la filiale de l'Université de La Rochelle dédiée à la valorisation des résultats de la recherche de l'établissement. L'objet et la méthodologie d'enquête pour la réalisation de l'étude de marché de l'épuration de l'air intérieur sur une durée de 4 mois (de fin 2014 à début 2015) sont décrits en Annexe 2.

2.2.3 Conduite d'auditions

Deux auditions ont été réalisées dans le cadre de cette expertise. La première de l'association de consommateurs UFC Que choisir – département des essais comparatifs (Mme Mélanie Marchais et M. Eric Bonneff), et la seconde de M. Frédéric De Blay et de Mme Martine Ott du CHRU de Strasbourg, dans l'objectif de recueillir des compléments d'informations sur leurs travaux sur des produits d'épurations et d'autres part, de recueillir leurs expériences et leurs attentes potentielles sur ces produits commercialisés en France. Les comptes-rendus de ces auditions figurent en Annexe 3 et Annexe 4.

3 Quelques repères sur la pollution de l'air intérieur

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique en France et dans de nombreux pays. En effet, l'environnement intérieur offre une grande diversité de situations d'exposition à de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, dont les conséquences sur la santé sont variables. Différentes sources peuvent être à l'origine de la présence de polluants dans l'air intérieur : des éléments constitutifs du bâti, propres au bâti, des équipements intérieurs, le comportement des occupants, l'environnement extérieur.

Depuis quelques années, une attention croissante est portée à la question de la qualité de l'air dans les bâtiments avec en particulier la mise en place d'une surveillance dans certains établissements recevant du public (ERP). En octobre 2013, les ministères chargés de l'environnement et de la santé ont lancé le Plan d'actions sur la qualité de l'air intérieur lors des deuxièmes assises nationales de la qualité de l'air. Reprenant les préoccupations exprimées lors de la table ronde Santé-Environnement de la Conférence Environnementale de septembre 2012, ce plan prévoit des actions à court, moyen et long terme afin d'améliorer la qualité de l'air dans les espaces clos. Celles-ci ont été intégrées dans le troisième Plan national santé-environnement (PNSE 3).

L'Anses réalise depuis plus de 10 ans des travaux d'expertise sur l'air intérieur qui s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration des connaissances. Les premiers travaux lancés ont porté sur l'élaboration de valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI) qui constitue le socle scientifique utilisé par les pouvoirs publics pour fixer des valeurs réglementaires de surveillance de la qualité de l'air intérieur. Pour une substance donnée, une VGAI vise à préserver la population générale de tout effet néfaste lié à l'exposition par inhalation à cette substance (Anses 2011).

D'autres travaux axés sur la réduction des émissions de polluants à leur source ont été réalisés ; par exemple la procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration (Afsset 2009a, 2006) qui permet de valoriser les matériaux « faiblement émissifs » sur la base d'essais normalisés. Dans la continuité de ces travaux, et dans un contexte d'élaboration de la réglementation applicable aux meubles, l'Anses a plus récemment travaillé sur les substances émises par les produits d'ameublement (Anses 2015).

Enfin, une étude exploratoire du coût socio-économique de la pollution de l'air intérieur a été conduite par l'Anses, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) et Pierre Kopp, Professeur d'économie de l'université Sorbonne Panthéon I, estimant à environ 19 milliards d'euros pour une année le coût de la pollution de l'air intérieur (Anses 2014b). Cette étude illustre bien les conséquences de cette pollution pour la collectivité, correspondant aux coûts de l'impact sanitaire généré par les 6 polluants retenus (coût estimé des décès prématurés, de la prise en charge des soins, des pertes de productions, etc.).

3.1 Sources

La qualité de l'air intérieur dépend de l'intensité des émissions provenant des sources de pollution présentes et du taux de renouvellement de l'air.

Outre la pollution d'origine extérieure (polluants atmosphériques urbains en général, mais aussi radon, pollens et micro-organismes), les sources de pollution intérieure sont multiples :

- **Les équipements fonctionnels : appareils à combustion** (chaudière, cuisinière à gaz, chauffe-eau : émissions de monoxyde de carbone et, de dioxyde d'azote), **appareils de chauffage** (émission d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lors de la combustion de bois, de charbon), **équipements électriques** (production d'ozone par des imprimantes laser) ;
- **Les constituants structurels du bâtiment : matériaux isolants et faux plafonds** (contiennent de l'amiante et d'autres fibres), **revêtements de sols, plaques murales...** ;
- **Les éléments décoratifs et mobilier** (formaldéhyde et autres composés organiques volatils (COV) émis par exemple par les panneaux en bois agglomérés, les moquettes ; phtalates émis par les sols et les papiers muraux plastifiés ; acariens issus des poussières de literies et de moquette...).
- **Les occupants et leurs activités** : tabagisme, utilisation de produits ménagers, bricolage, acariens, moisissures, animaux de compagnie, etc.
 - **La fumée de tabac environnementale** (ou tabagisme passif) en particulier est exhalée par le fumeur ou émise par des cigarettes, pipes ou cigares qui se consomment. Cette fumée contient plus de 4 000 substances : monoxyde d'azote, benzène, monoxyde de carbone, ammoniac, acide cyanhydrique, métaux lourds, etc.
 - **Les produits ménagers** sont d'importantes sources de COV ; l'emploi de produits biocides (ex : produits de traitement du bois) et/ou de produits phytosanitaires (traitement des plantes) constituent notamment des sources d'émissions polluantes. Les désodorisants d'intérieur, les bougies, encens etc. sont également des sources de pollution susceptibles de libérer entre autres des COV.
 - **Le bricolage** conduit à l'usage de peintures, laques, résines, papiers, vernis, colle, et autres produits susceptibles de libérer des COV ainsi que des particules et des fibres.

3.2 Polluants d'intérêt, pathologies associées

Les problèmes de santé liés à la pollution de l'air intérieur recouvrent un large spectre de manifestations cliniques, qui sont pour la plupart non spécifiques. On recense des manifestations allergiques, des problèmes inflammatoires, des infections et des troubles cardiovasculaires ou neurologiques, des intoxications létales ou invalidantes sont recensées. Certains des polluants retrouvés dans l'air l'intérieur sont par ailleurs identifiées comme des cancérogènes avérés ou probables par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC).

Les effets sur la santé se distinguent selon le type d'exposition :

- les effets souvent immédiats liés à une exposition de courte durée à de fortes concentrations en polluants. Les intoxications aiguës au monoxyde de carbone en sont la principale illustration,

- les effets apparaissant suite à une exposition de longue durée à de faibles concentrations de polluants ou suite à une accumulation de la substance dans l'organisme.

Les études épidémiologiques sur le lien entre pollution de l'environnement intérieur et effets sanitaires se développent depuis quelques années. Elles ont tout d'abord porté sur les expositions à la fumée de tabac environnementale et aux biocontaminants, principalement les allergènes et les moisissures et plus récemment sur les polluants chimiques comme les aldéhydes. Ces études suggèrent un lien entre l'exposition à des polluants de l'air intérieur en France et la survenue d'effets respiratoires (Annesi-Maesano *et al.* 2012, Billionnet *et al.* 2011).

La présence de polluants n'implique pas nécessairement de conséquences sanitaires. Les effets sur la santé dépendent du type de polluant(s), de sa (leur) concentration, de la durée d'exposition (temps passé en présence du polluant) et de la sensibilité de chaque individu.

Le Tableau 1 présente de façon synthétique différents polluants ou familles de polluants susceptibles de se retrouver dans l'air intérieur et les effets sur la santé associés, recensés de façon générale. Les substances étudiées dans l'expertise VGAI sont présentées dans ce tableau pour illustrer les effets sur la santé ainsi que les études clés retenus pour l'élaboration de ces valeurs. Pour les effets cancérigènes, le classement du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) est donné.

Tableau 1 : Les principaux polluants de l'air intérieur et leurs effets sur la santé

	Effets sanitaires
Radon	<ul style="list-style-type: none"> - Cancer du poumon - Cancérogène pour l'Homme - Groupe 1 (CIRC 1987)
COV	<ul style="list-style-type: none"> - Irritation de la peau, des muqueuses et du tractus respiratoire ; - Nausées, maux de tête et vomissements, allergie respiratoire ; - Cancers ; - Altération de la reproduction et effets sur le développement. <p>Exemples :</p> <p><u>Trichloroéthylène (TCE) et tétrachloroéthylène (PCE)</u> : Effets neurologiques (symptômes narcotiques) , rénaux et hépatiques (Afsset 2009d, c) Le TCE est classé cancérogène pour l'Homme (cancers multi-site : foie, poumon, reins, testicules, système hématopoïétique) - Groupe 1 (CIRC, 2012) Le PCE est classé cancérogène probable chez l'Homme - Groupe 2A (CIRC 2012b)</p> <p><u>Benzène</u> : Effets hématologiques (leucopénies, thrombocytopénies, granulopénies, pancytopenies, éosinophilies, aplasies médullaires et anémies aplasiques) (Afsset 2008b) Cancérogène pour l'Homme (syndrome myéloprolifératif et leucémies) - Groupe 1 (CIRC 2012d)</p>
Aldéhydes	<ul style="list-style-type: none"> - Irritation de la peau, des muqueuses et du tractus respiratoire ; - Cancers. <p>Exemples :</p> <p><u>Formaldéhyde</u> : effet irritant au niveau respiratoire et oculaire (Afsset 2007b) Cancérogène pour l'Homme (cancer du nasopharynx) - Groupe 1 (CIRC 2012d)</p> <p><u>Acroléine</u> : effet irritant au niveau au niveau respiratoire et oculaire Niveau de preuve insuffisant pour les effets cancérigènes – inclassable -</p>

	Effets sanitaires
	Groupe 3 (Anses 2013) <u>Acétaldéhyde</u> : effet irritant au niveau au niveau respiratoire et oculaire (Weber-Tschopp et al., 1977; Dorman et al., 2008). Cancérogène possible pour l'Homme - Groupe 2B (Anses 2014c)
Oxydes d'azote (NOx)	– Irritation de l'appareil respiratoire, crises d'asthme et bronchiolite. Exemple : <u>Dioxyde d'azote</u> : effets respiratoires (bronchite, obstruction bronchique, toux persistante, sifflement, wheezing, dyspnée) (Afsset 2007c)
Monoxyde de carbone	– Maux de tête, nausées, vomissements ; – Vertiges, perte de connaissance ; – Coma, mort (Afsset 2007c)
Phtalates	– Altération de la reproduction et effets sur le développement ; atteintes du foie et des reins. Exemple : <u>DEHP</u> : Cancérogène possible pour l'Homme - Groupe 2B (CIRC 2013)
HAP	– Effets au niveau du sang, du système immunitaire et du foie développement d'athérosclérose ; – Altération de la reproduction ; – Cancers. Exemple: <u>Naphtalène</u> : effets respiratoires (inflammation) (Afsset 2009b) Cancérogène possible pour l'Homme - Groupe 2B
Fumée de tabac environnementale	– Irritation des yeux, du nez et de la gorge ; – Irritation des voies respiratoires et infections respiratoires ; – Cancer du poumon ; – Maladies cardiaques ; – Crises d'asthme ; – Effets sur le développement ; Cancérogène chez l'Homme - Groupe 1 (CIRC 2012c)
Biocontaminants (moisissures, allergènes d'animaux, pollens, etc.)	– Pathologies respiratoires (toux, rhinite, asthme, etc.) ; – Allergies ; – Infections cutanées et respiratoires ; – Infection pulmonaire (aspergillose invasive) pour les sujets aux défenses immunitaires diminuées. Non évalué par le CIRC.
Amiante	– Epanchement ou plaques pleurales ; – Fibroses pulmonaires (asbestose) ; – Cancers du poumon ou de la plèvre (mésothéliome). Cancérogène chez l'Homme - Groupe 1 (CIRC 2012a)
Fibres Minérales Artificielles	– Irritation de la peau et des yeux ; – Effets respiratoires non cancérogènes suspectés ; – Cancers. (Anses 2014a, 2016a) Laines minérales et filaments – groupe 3. (Afsset 2007a, 2008a)
Particules PM_{2,5} et PM₁₀	– Altération des fonctions respiratoires ; – Aggravation de l'asthme, avec à long terme des pathologies respiratoires chroniques (broncho-pathologie-chronique-obstructive - (BPCO) ou le développement de cancers). Non évalué par le CIRC (renvoi à la pollution atmosphérique extérieur classé cancérogène chez l'Homme – groupe 1 (CIRC, en cours)

3.3 Politiques publiques et réglementation

Dans les paragraphes 3.3.1 et 3.3.2 qui suivent sont succinctement présentés les principaux éléments de planification et de réglementation relatifs à la qualité de l'air. L'annexe 5 présente plus en détail les éléments réglementaires.

3.3.1 Prévention, limitation des sources et surveillance

Les mesures de politiques publiques pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur se déclinent depuis 2004 dans le cadre du plan national santé environnement. Les deux premiers plans (PNSE 1 2004-2008 ; PNSE 2 2009-2014) ont intégré des actions qui visaient à améliorer les connaissances dans ce domaine et à limiter les sources de pollution à l'intérieur des bâtiments, mais aussi des actions sur la construction des bâtiments et la maîtrise des installations d'aération, de ventilation et de climatisation.

La profession de conseillers en environnement intérieur, intervenant généralement sur prescription médicale pour identifier les diverses sources d'allergènes et de polluants au domicile de personnes souffrant de maladies respiratoires ou allergiques liées à l'air intérieur, a été développée sous l'impulsion du 2^{ème} PNSE avec la création de 18 postes sur financement du ministère chargé de l'environnement.

La réglementation dans le domaine de qualité de l'air intérieur repose à la fois sur la prévention de la santé publique associée à certains polluants (amiante, radon, monoxyde de carbone, tabagisme passif) mais aussi sur 2 engagements forts du Grenelle de l'environnement, en 2007 :

- La mise en place d'un étiquetage des matériaux de construction et de décoration ;
- La surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public.

Les matériaux de construction, les produits de décoration et les meubles sont régulièrement cités comme des sources de pollution des environnements intérieurs du fait de leurs émissions en polluants volatils, voire semi-volatils.

Les produits de construction et de décoration vendus en France sont soumis à une obligation d'étiquetage depuis le 1er septembre 2013⁴. L'étiquette permet d'indiquer de manière simple et lisible le niveau d'émission du produit en polluants volatils. Ce niveau d'émission est indiqué par une classe allant de A+ (meilleure classe) à C ; 4 classes étant proposées à partir des émissions évaluées pour 11 paramètres : 10 COV individuels et les composés organiques volatils totaux (COVT).

La surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public se met en place progressivement notamment dans les établissements accueillant des enfants⁵. L'évaluation des moyens d'aération et la mesure de polluants (formaldéhyde, benzène) et du dioxyde de carbone en tant qu'indicateur de confinement sont proposés avec des dispositions particulières de prévention de la qualité de l'air⁶.

Les mesures de polluants seront en particulier mises en regard des valeurs-guides réglementaires pour l'air intérieur et de valeurs déclenchant des investigations complémentaires. Ces valeurs ont en particulier été fixées dans la réglementation française sur la bases des travaux d'expertise menés par l'Anses et ayant abouti à l'élaboration de VGAI.

⁴ Article L221-10 du Code de l'environnement, décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 et arrêté du 19 avril 2011 (modifié)

⁵ Article L221-8 du Code de l'environnement et décret 2011-1728 du 2 décembre 2011

⁶ Article L221-8 du Code de l'environnement, décret n°2012-14 du 5 janvier 2012

Le 3^{ème} PNSE pour la période 2015-2019, intègre les 26 actions du plan de qualité de l'air intérieur (PQAI) publié en octobre 2013 (action 49 : mettre en œuvre le plan de qualité de l'air intérieur).

Ces 26 actions sont regroupées en cinq thématiques :

- Informer le grand public et les acteurs relais
- Développer l'étiquetage pour les produits susceptibles d'émettre des polluants dans l'air intérieur
- Dans la filière du bâtiment, développer les actions incitatives et préparer les évolutions réglementaires en lien avec la réglementation thermique
- Progresser sur le terrain vis-à-vis de pollutions spécifiques
- Améliorer les connaissances.

La communication est orientée sur le comportement des occupants afin de rappeler les bonnes pratiques et de lutter contre les idées fausses sur la qualité de l'air intérieur. Le baromètre santé environnement 2007 réalisé par l'INPES⁷, montre que parmi les différents sujets environnementaux, la pollution de l'air intérieur est l'un des sujets sur lesquels la population se sent la moins bien informée. Dans ce baromètre réalisé avant la campagne d'information de l'INPES de 2007, 49 % s'estimaient « plutôt bien » informés, tandis que 41 % se déclaraient « plutôt mal » informés et 10 % n'en avaient jamais entendu parler.

Une information et un étiquetage de certains produits de consommation émetteurs de polluants volatils est proposée, tels que produits désodorisants (encens, bougies et masquants d'odeur) et produits d'entretien. Une attention particulière sera portée aux meubles pour enfants. Enfin en lien avec la rénovation thermique des logements, une vigilance sur la qualité de l'air intérieur sera portée avec notamment la formation des professionnels du bâtiment et de la santé.

3.3.2 Aération et ventilation

L'une des premières mesures de prévention mise en avant pour améliorer la qualité de l'air intérieur est d'assurer une aération régulière, même de courte durée de son logement, y compris en période de chauffage des locaux.

Dans la campagne de l'INPES dédiée à la pollution de l'air intérieur de 2007, trois gestes simples étaient proposés dont aérer 10 minutes chaque jour et ventiler.

Les systèmes de ventilation (naturelle par des bouches d'aération ou mécanique avec une VMC) sont normalement conçus pour apporter de l'air neuf aux occupants et évacuer les polluants se trouvant à l'intérieur des locaux principalement dans les pièces d'eau (cuisine, salle de bain/douches). Les systèmes peuvent comporter d'autres fonctionnalités, qui peuvent être de chauffer (et éventuellement refroidir) tout en assurant généralement de façon conjointe le renouvellement de l'air. On parle alors de conditionnement d'air.

L'OQAI a réalisé un état des lieux de la ventilation dans le parc de logements français (OQAI 2009) à partir des données collectées sur l'échantillon de 567 logements représentatif des 4 millions de résidences principales en France. La moitié des logements se caractérise par des constructions anciennes (avant 1967) non soumises aux exigences réglementaires instaurant le

⁷ Depuis le 1er mai 2016, l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (Inpes), l'Institut de veille sanitaire (InVS) et l'Établissement de préparation et de réponse aux urgences sanitaires (Eprus) sont devenus Santé publique France.

principe de la ventilation générale et permanente. L'équipement des logements est représenté majoritairement par des systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC) et ventilation naturelle (70%). Dans ses conclusions, l'OQAI met en avant que les logements les plus récents montrent une meilleure maîtrise des conditions d'aération grâce aux systèmes mécanisés mais ceux-ci accusent fréquemment des dysfonctionnements qui limitent fortement leur fiabilité. Le comportement des occupants est aussi mis en avant comme ayant un rôle déterminant dans l'aération des logements dans les conclusions de l'OQAI notamment en lien avec les ouvertures de fenêtres (OQAI 2009).

Dans son guide de la pollution de l'air intérieur « Tous les bons gestes pour un air intérieur plus sain », l'INPES rappelle que pour une bonne ventilation, il ne faut pas obstruer les entrées d'air, les grilles d'aération et les bouches d'extraction, et les entretenir tous les ans, notamment en les dépoussiérant. Les VMC doivent être vérifiées tous les trois ans. (INPES 2009).

Les exigences réglementaires relatives à l'aération des locaux en construction neuve ont évolué au fil du temps avec une formulation et une nature différentes en fonction de l'usage du bâtiment (habitat, établissement recevant du public⁸, lieux de travail pour lesquels des dispositions spécifiques figurent dans le code du travail). Ces exigences concernent les conditions d'aération des locaux. Le premier texte cité dans le guide « Construire sain » (MEDDE 2011) remonte à 1955 (Décret 55-1394) ; il prévoit une aération pour la cuisine et la pièce principale et l'obligation d'aération permanente lorsque les baies du logement donnent sur une même façade.

Les dispositions en matière d'aération consistent notamment en des tailles minimales d'ouvrants ou des volumes minimaux de locaux, des exigences relatives aux grilles d'entrée ou de sortie d'air, aux conduits de ventilation naturelle, ainsi que des valeurs de débits minimaux d'air extrait (habitat) ou d'air neuf entrant (bâtiments autres que d'habitation).

Issue des engagements du Grenelle de l'environnement (2007), la réglementation thermique RT 2012 s'applique depuis le 1^{er} janvier 2013 à toutes les constructions neuves (sauf quelques cas particuliers). Le ministère chargé de l'environnement affiche l'objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments en suscitant une évolution technologique pour les filières du bâti et des équipements et une qualité énergétique du bâti. La RT 2012 se fonde sur des exigences de résultats pour la performance énergétique du bâtiment et sur quelques exigences de moyens (perméabilité à l'air attestée, traitement des ponts thermiques, recours aux énergies renouvelables, surface minimale de baies vitrées...).

La performance énergétique repose sur la consommation d'énergie primaire conventionnelle limitée à 50 kWh/m².an qui est la valeur moyenne du label « bâtiments basse consommation » (BBC), qui constitue à présent la référence dans la construction neuve.

⁸ Exigences contenues dans le règlement sanitaire départemental (RSD)

4 Recensement des dispositifs « épurateurs d'air » et estimation de leur part de marché en France

L'étude de marché réalisée à la demande de l'Anses a permis de fournir un premier panorama du marché des épurateurs d'air intérieur en France en dénombrant les produits commercialisés, les technologies associées et les polluants traités, et en identifiant les réseaux de fabrication et de distribution. Un exercice d'extrapolation a été réalisé pour estimer les volumes de vente annuels.

4.1 Description du marché

Les chiffres clés tirés de cette étude sont les suivants :

- Près de **500 dispositifs d'épuration d'air intérieur (497 références commerciales identifiées)** ont été recensés couvrant les différentes familles ciblées. Il s'agit d'appareils autonomes (petits appareils portatifs à destination du grand public ou adaptés aux professionnels), de climatiseurs, de matériaux de construction et de décoration, d'objets revendiquant des propriétés d'épuration et de sprays, diffuseurs.
- **170 millions d'euros de chiffre d'affaire** porté majoritairement par la vente de sprays assainissant (et notamment désodorisants) représentant une part de 62 %. Suivent les matériaux de construction et de décoration avec une part de marché estimée à 26%. Une forte croissance du marché des sprays est notée actuellement en lien avec les campagnes de publicité récentes. En excluant les sprays assainissant dont la revendication est principalement l'élimination ou le masquage des odeurs, le marché de l'épuration de l'air intérieur représenterait **87 millions d'euros** mettant les sprays dit purifiant en deuxième position en termes de valeur marchande (25 %) après les matériaux de construction et de décoration.
- **192 fabricants** dont la majorité réalise de la vente directe (58 %) et **154 distributeurs** dont des sites de vente en ligne qui se caractérisent par des évolutions extrêmement rapides, et le développement de plateforme avec différents revendeurs. Les produits commercialisés par des distributeurs sont principalement issus d'une gamme restreinte (moins de 5 produits pour 70% des distributeurs).

La Figure 1 présente l'estimation des ventes pour les différentes familles de produits ciblés. Les principales caractéristiques des fabricants et distributeurs de dispositifs d'épuration d'air intérieur commercialisés en France sont représentés sur la Figure 2.

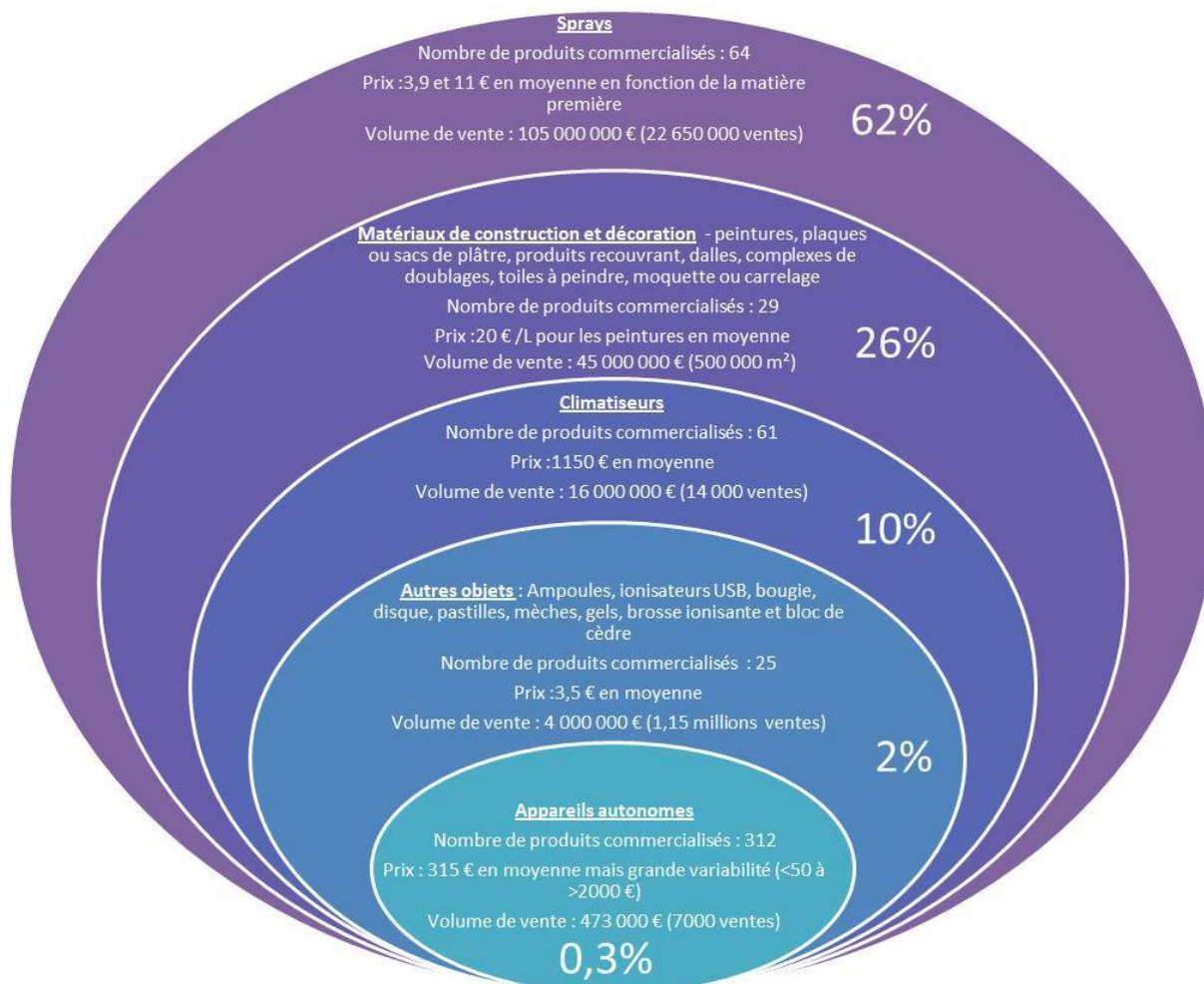


Figure 1 : Représentation de l'analyse globale du marché de l'épuration de l'air intérieur estimé à environ 170 473 000 € dans cette étude en fonction de la part du marché (exprimé en %)

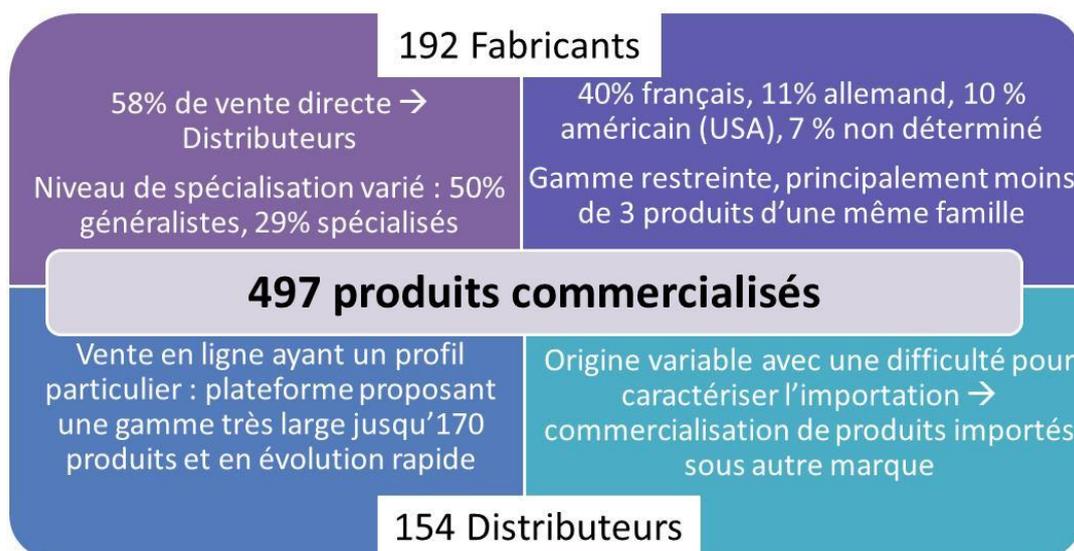


Figure 2 : Caractéristiques principales du réseau de fabrication et de distribution des produits d'épuration d'air intérieur commercialisés en France

L'émergence de nombreux produits sous différents formats et reposant sur des technologies plus ou moins évoluées a été mise en évidence dans l'étude. Les produits peu onéreux et reposant sur peu d'indications de maintenance représentent la plus grande part des ventes en France.

Une trentaine d'entretiens a été réalisée dans le cadre de cette étude (la liste des experts, fabricants, distributeurs et prescripteurs auditionnés est présentée en Annexe 2). D'après les personnes auditionnées, il ressort les éléments suivants en termes de « visibilité/appréhension du marché » :

- Le marché apparaît en pleine évolution. Les innovations porteraient plus sur le design et les services associés notamment en matière de suivi et de mesures (capteurs, voyants, indicateur de saturation etc.) et non sur les technologies. Une limitation des dépenses énergétiques en lien avec la réglementation RT 2012 peut encourager le recours à des technologies passives.
- Le développement du marché à court terme est pressenti de façon unanime en lien notamment avec la dynamique existante en Asie et aux Etats-Unis et l'importation de produits.

Le marché est considéré comme très mature en Asie (Corée et Japon en particulier) où des purificateurs sont couramment utilisés depuis une cinquantaine d'années. Le marché s'est encore plus fortement développé ces trois dernières années en Chine avec la forte sensibilisation de la population à la santé et le caractère « hygiéniste » de la culture asiatique. Le marché américain est également considérable avec un développement sur les deux dernières décennies en raison des problèmes d'allergie et d'asthme ce qui explique le marketing fortement axé sur la santé.

- L'article R221-30 du Code de l'environnement prévoit une obligation de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public par les propriétaires ou les exploitants des établissements publics ou privés, dont la mise en œuvre est cependant suspendue.
- Que ce soit au niveau des motivations des acheteurs ou des cibles des fabricants, les profils cités sont en premier lieu les personnes soucieuses de leur santé ou de leur famille, notamment celles ayant des problèmes d'allergie ou de santé respiratoire, puis celles sensibles à la problématique de la pollution de l'air. Au-delà d'un certain intérêt des français pour les thématiques relatives à la pollution de l'air intérieur, il n'est pas observé de mobilisation forte ni un équipement accéléré des ménages et des professionnels en produits d'épuration. De même, l'intérêt des prescripteurs tels que les architectes reste faible.
- Par contre, une offre spécifique se développe pour le secteur médical (hôpitaux, cabinets dentaires ou prothésistes). D'autres secteurs professionnels ont été cités de façon marginale comme cible : il a été relevé les salons de coiffures et/ou de manucures, hôtels, pressings et animaleries. La demande pour le secteur tertiaire et résidentiel est envisagée mais les contraintes de dimensionnement pour le traitement de bâtiments collectifs ont été soulignées.
- Une vigilance est observée sur les informations fournies par les industriels considérées davantage comme des arguments commerciaux visant à convaincre les consommateurs et non une information précise sur l'efficacité et l'usage du produit. Le caractère incomplet de ces informations, voire mensonger ou trompeur a été cité à l'occasion de plusieurs entretiens.

- Enfin, le message important ressortant des entretiens d'experts est que l'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe et doit passer en priorité par la limitation des sources et l'optimisation du renouvellement d'air (ventilation) ; le recours à l'épuration de l'air intérieur devant se limiter à des situations très spécifiques.

4.2 Focus sur les technologies d'épuration et les polluants ciblés

4.2.1 Technologies d'épuration recensées

Les sprays assainissant dominant le marché reposent sur des propriétés biocides (Figure 3). Il est distingué dans cette étude les produits dits « naturels » à base d'huiles essentielles principalement, et les désodorisants plus classiques largement distribués dans la grande distribution, qui peuvent revendiquer une action assainissante, au-delà du masquage des odeurs...

Plus de 80 % des fabricants sont des acteurs spécialisés dans le bien-être, l'aromathérapie, la phytothérapie, les cosmétiques et la propreté (produits d'entretien). Ces produits sont vendus en grande surface ou dans des enseignes spécialisés, magasins bio et/ou des pharmacies/parapharmacies.

67 % d'entre eux revendiquent une action, autre qu'un masquage, sur les odeurs rejoignant l'appellation de sprays désodorisants et 60 % une action sur les biocontaminants.

L'intérêt du public pour ces produits est confirmé par les chiffres de vente. Plusieurs des acteurs auditionnés ont souligné le manque d'études sur l'efficacité mais aussi sur les émissions de ces produits.

Pour les autres familles de produits d'épuration, une diversité de technologies est mise en œuvre dans les systèmes notamment au niveau des appareils autonomes avec en tête la filtration mécanique (45%) souvent combinée à d'autres technologies (ionisation, adsorption physique etc.) (Figure 4, Figure 5 et Figure 6). Le principe de ces différentes technologies est précisé dans le chapitre 5.

La moitié des produits repose sur une seule technologie d'épuration d'air. Pour l'autre moitié, il peut y avoir jusqu'à 5 technologies associées, correspondant pour la plupart à une succession de couches de filtration complémentaires.

Il est à souligner cependant certaines limites. En effet, à l'occasion de l'étude conduite, il n'a pas toujours été possible de classer certains épurateurs d'air intérieur compte tenu des incertitudes sur les principes d'épuration mis en œuvre et aux informations peu précises fournies par les fabricants.

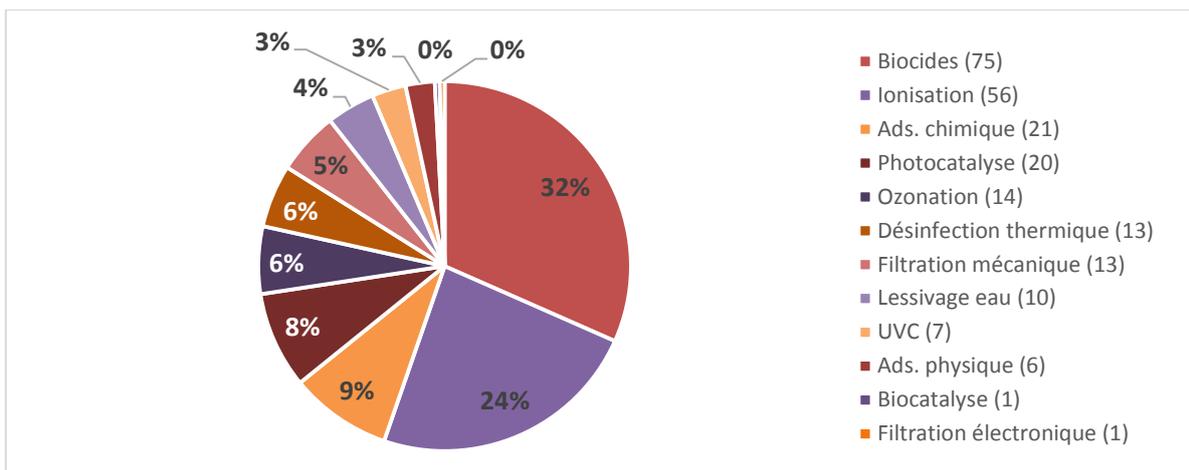


Figure 3 : Technologies les plus utilisées par les produits mobilisant une seule technique d'épuration

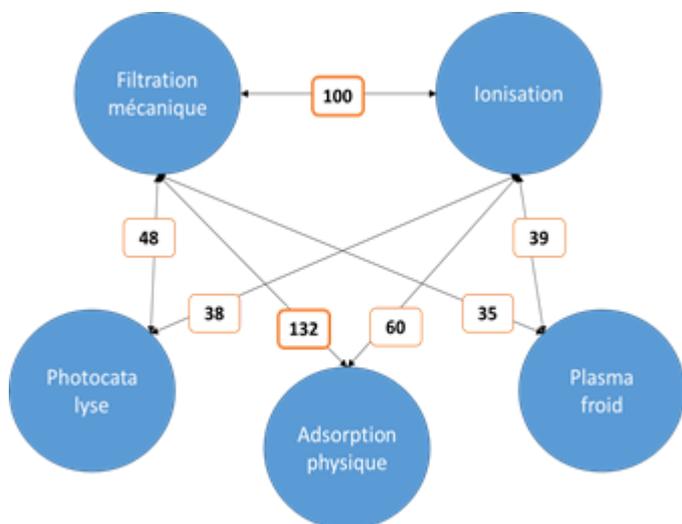


Figure 4 : Associations et nombre de technologies les plus rencontrées

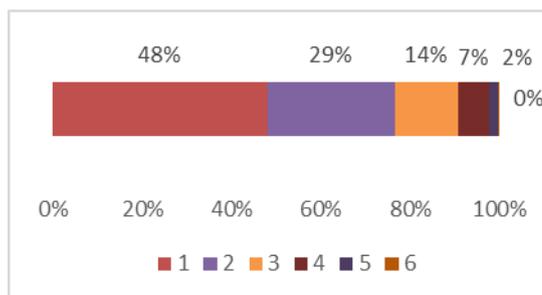


Figure 5 : Pourcentage de dispositifs d'épuration en fonction du nombre de technologies

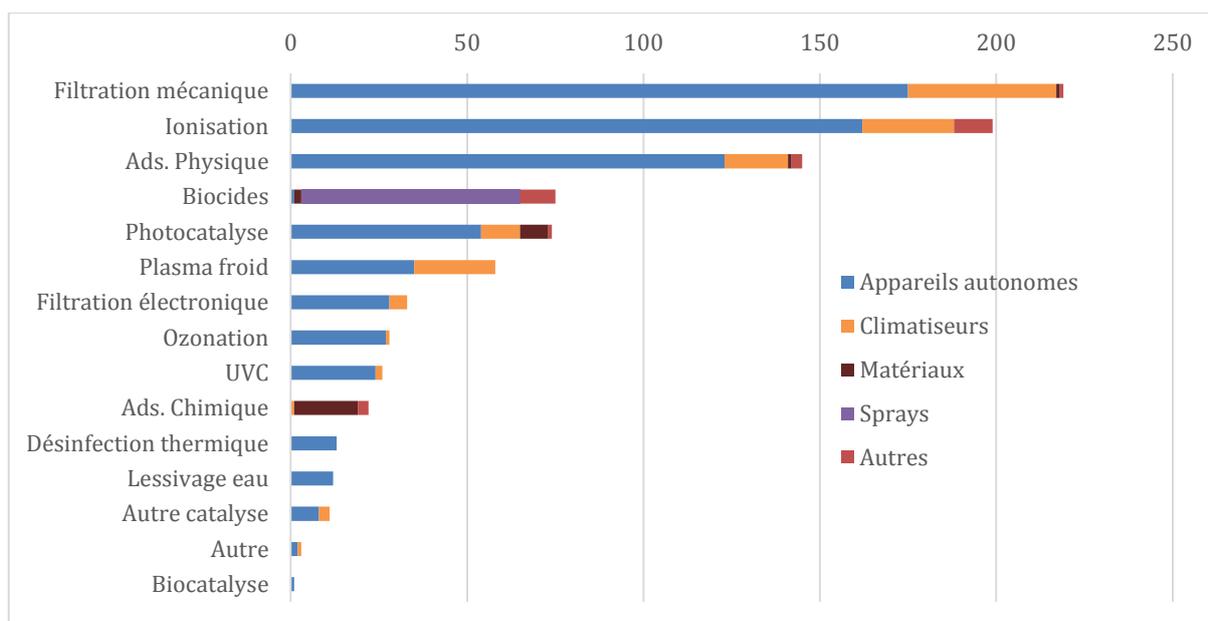


Figure 6 : Nombre de dispositifs par technologies d'épuration utilisées

4.2.2 Polluants traités

L'analyse globale réalisée dans l'étude montre que les **polluants traités** selon les revendications des produits recensés sont par ordre décroissant :

- Des polluants gazeux organiques en intégrant les odeurs dans cette catégorie, pour 75% des produits recensés. De façon générale, il est cité une action sur les COV, hydrocarbures, aldéhydes, cétones et spécifiquement sur le formaldéhyde, le benzène, le toluène, l'éthylène, le glutaraldéhyde et le phénol.

Le traitement des odeurs est une des revendications principales quelle que soit la famille de produits (59% des appareils). A noter que les appareils autonomes, les sprays et les autres articles ciblent beaucoup les odeurs. Les termes employés sont diversifiés ; il a été relevé : mauvaises odeurs / odeurs déplaisantes / odeurs désagréables avec dans certains cas des éléments plus précis comme : odeurs de tabac, cuisine, poubelles, toilette, moisissures, renfermé, animaux, peinture, chaussures.

- Les biocontaminants (68% au total) en distinguant les allergènes (pollens, acariens et animaux) (54%) dont l'épuration est principalement revendiquée par les appareils autonomes et climatiseurs.

Là encore, une diversité de termes est employée pour décrire les biocontaminants traités : biocontaminants aéroportés/ micro-organismes aéroportés, micro-organismes (nuisant à la santé pour un produit), organismes microscopiques en suspension jusqu'à 0,3 micron ou jusqu'à 0,01 micron, éléments pathogènes, spores de moisissures, moisissures, champignons, bactéries (légiennelles, *E. Coli* précisées dans quelques cas), virus avec l'identification spécifique du virus de la grippe et H1N1, germes, mites, Bacille (dont EHEC pour un produit), microbes, levures. Des revendications portent aussi sur les pellicules, squames et poils d'animaux domestiques, punaises de lit et mites.

- Les particules (57%) dont l'épuration est principalement revendiquée par les appareils autonomes et climatiseurs en cohérence avec la mise en œuvre de la filtration mécanique.

Les terminologies employées sont les suivantes : poussières (avec quelques fois les précisions suivantes : fines, de toner, de chantier, d'oiseaux), particules (fines, petites, grosses, micro, aéroportées, dans l'air, diesel, en suspension, de toutes tailles, de toutes sortes, PM_{2,5} et PM₁₀, nocives/polluantes, de saleté), fibres, cendres, cheveux, peluches, squames, poils.

Pour deux produits d'un même fabricant, il est mentionné la pollution minérale (amiante, carbone, poussières de métaux, fibres d'isolants, poussières de ciment, fibres textiles).

- Des polluants inorganiques (6%) : ozone (O₃), oxydes d'azote (NO_x), ammoniac (NH₃), le dioxyde de carbone (CO₂), Notons que le mercure est cité pour un appareil autonome intégrant une technologie d'adsorption physique et de filtration mécanique.

De nombreux termes génériques sont aussi utilisés : la fumée (40%) que ce soit de tabac, de cigarette, de combustion, de soudure ou encore suie ; puis faisant référence à des « polluants de l'air »⁹, à des problèmes de santé avec les 2 cas suivants « Rhumes, bronchites, sinusites » et « le manque de concentration, les maux de tête chroniques, le Syndrome des bâtiments malsains, à des produits de consommation « Insecticides, photocopieuse, spray pour cheveux », à des paramètres « humidité, ions négatifs, oxygène actif, électricité statique, cations produits par des appareils électriques, charges électrostatiques » et enfin des accroches commerciales « assainit l'air, maison saine et fraîche, air propre et revitalisant, purifie et rafraîchit l'atmosphère, purifie, assainit et rafraîchit l'atmosphère » qui ne détaillent pas les polluants traités, ceci étant principalement constaté pour les produits commercialisés sur les plateformes de vente en ligne.

Les appareils autonomes et les climatiseurs sont les produits ayant la plus grande étendue de polluants traités à relier à la diversité des technologies mises en œuvre (Figure 7).

⁹ Pollution, pollutions ambiantes, polluants communs de l'air intérieur, polluants nocifs, polluants atmosphériques/polluants contenus dans l'atmosphère, pollution de combustion, pollution domestique et industrielle, pollution volatile, micro-polluants, résidus toxiques, substances polluantes, déchets organiques et de cuisine, gaz industriels, gaz d'échappement, émanations de véhicules, substances chimiques/ gaz chimiques nocifs/ composés chimiques, substances gazeuses toxiques, gaz toxiques

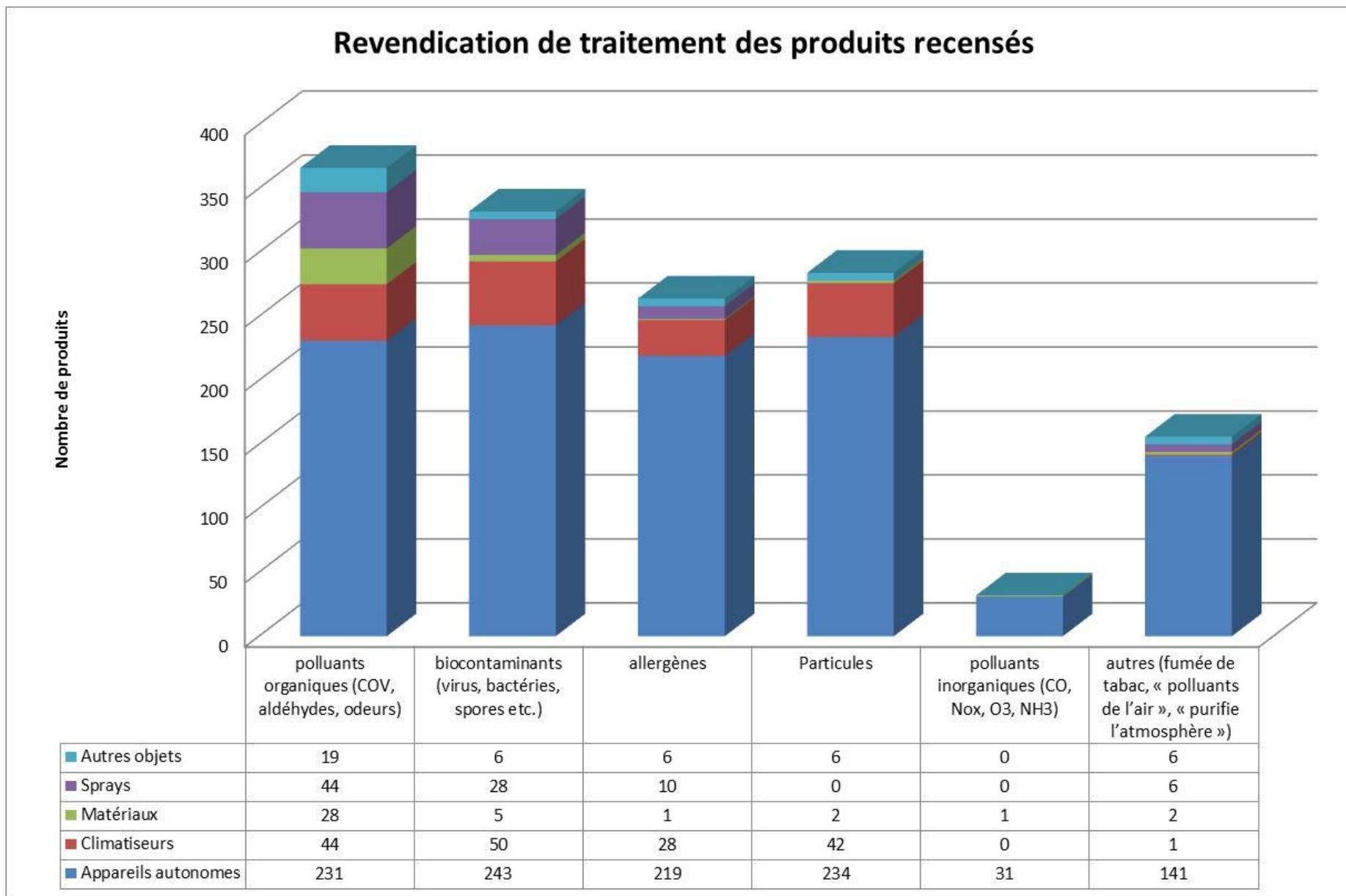


Figure 7 : Polluants traités par les différentes familles de produits recensés et nombre de références par polluant et type de produits

5 Description des différentes techniques/principes d'épuration mises en œuvre par les dispositifs recensés

Plusieurs techniques d'épuration sont disponibles sur le marché en fonction des contaminants à épurer. Ces techniques reposent sur deux grands principes le piégeage et la destruction des contaminants.

5.1 Les techniques de piégeage

5.1.1 Filtration mécanique

5.1.1.1 Principe et utilisation de la filtration

La filtration est une opération qui consiste à enlever des particules de l'air sur la base de phénomènes physiques et mécaniques : le tamisage, l'inertie, l'interception et la diffusion. Cette opération est réalisée en utilisant un média qui est constitué par le support sur lequel est réalisée la filtration.

Cette technique est couramment utilisée dans l'industrie de pointe, la recherche nucléaire, les salles blanches, l'aéronautique, l'électronique, mais aussi dans les laboratoires. Dans les hôpitaux, l'installation de filtres est notamment recommandée dans le système de ventilation des salles d'opération et dans les chambres des malades immunodéprimés. Elle constitue la base du traitement de l'air dans les locaux d'habitation ou recevant du public. La nouvelle norme européenne EN 13779 (NF EN 13779 juillet 2007), maintenant adoptée comme norme nationale dans la plupart des pays, spécifie les performances de filtration nécessaires pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur en fonction de l'air neuf.

5.1.1.2 Mécanismes de capture des particules

La capture des particules par les fibres du media est régie par différents mécanismes dont les principaux sont :

- *La diffusion brownienne* (Figure 8) : les particules sont agitées par le mouvement brownien des molécules de gaz ce qui les dévie des lignes de courant du fluide porteur vers les fibres du filtre. Au voisinage de la fibre collectrice, les particules peuvent alors être capturées sous l'effet de différentes forces d'adhésion. Ce mécanisme est prépondérant pour les particules de petite taille ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$).

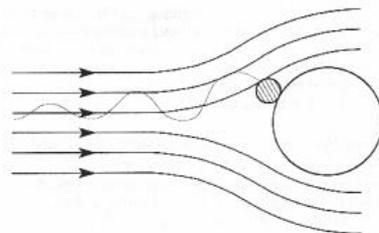


Figure 8 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet de diffusion

- *L'interception directe* (Figure 9) : les particules possédant une faible inertie peuvent suivre les lignes de courant du fluide porteur lorsqu'elles contournent les fibres. La particule sera interceptée lorsque la distance de la particule à la surface de la fibre sera inférieure à son rayon.

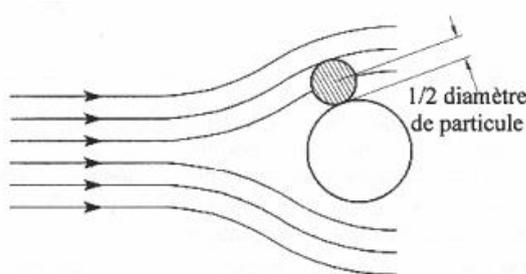


Figure 9 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet d'interception

- *L'impaction inertielle* (Figure 10) : les particules ayant suffisamment d'inertie quittent les lignes de courant lors de changements brusques de direction ou lors d'accélération au voisinage de la fibre, pour s'y impacter. Ce mécanisme est prépondérant pour les particules de taille importante ($d_p > 0,1 \mu\text{m}$).

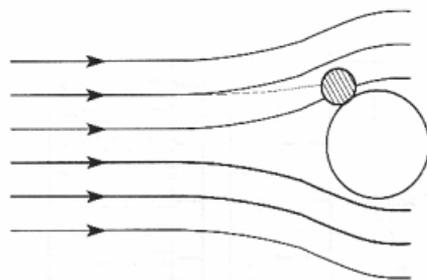


Figure 10 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet d'inertie

- *Le tamisage* (Figure 11) : Les particules d'un diamètre supérieur à la distance entre deux fibres ne peuvent pas passer.

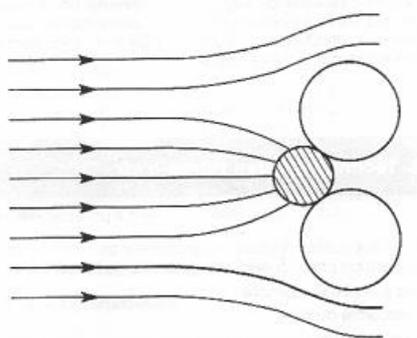


Figure 11 : Mécanismes de capture des particules sur une fibre – Effet tamisage

Il convient de noter qu'en filtration de l'air, on essaie généralement de retenir les particules de petite dimension. Les mécanismes d'interception et de diffusion sont donc privilégiés.

Pour cela la vitesse de l'air dans les médias fibreux est réduite pour augmenter la probabilité du contact particule/fibre.

5.1.1.3 Efficacité de filtration

L'allure théorique de la courbe d'efficacité en fonction du mécanisme de capture et du diamètre des particules est représentée sur la Figure 12 (Bonnevie-Perrier 2008). La courbe passe par un minimum d'efficacité pour un diamètre de particule situé entre 0,1 et 0,3 μm . Ce minimum correspond à une dimension de particule appelée la MPPS (Most Penetrating Particle Size), soit la taille de la particule la plus passante.

Pour des particules de petite taille ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$) (Bailly, Clerc-Renaud, et Rutman 2001), le mécanisme de diffusion est prédominant. Il est d'autant plus efficace que les particules sont petites, excepté dans le cas de particules nanométriques, pour lesquelles des études récentes semblent montrer un second minimum de filtration qui pourrait être expliqué par le phénomène de rebond thermique de ces particules (Van Gulijk et Bal 2004) ou par des effets électrostatiques (Huang *et al.* 2007).

Pour des particules de taille supérieure à 0,3 μm , les mécanismes prépondérants sont l'interception et l'impaction inertielle dont l'importance croît avec la taille des particules. Pour des particules de diamètre situé entre 0,1 et 0,3 μm , il y a compétition entre les différents mécanismes

de capture et aucun ne prédomine.

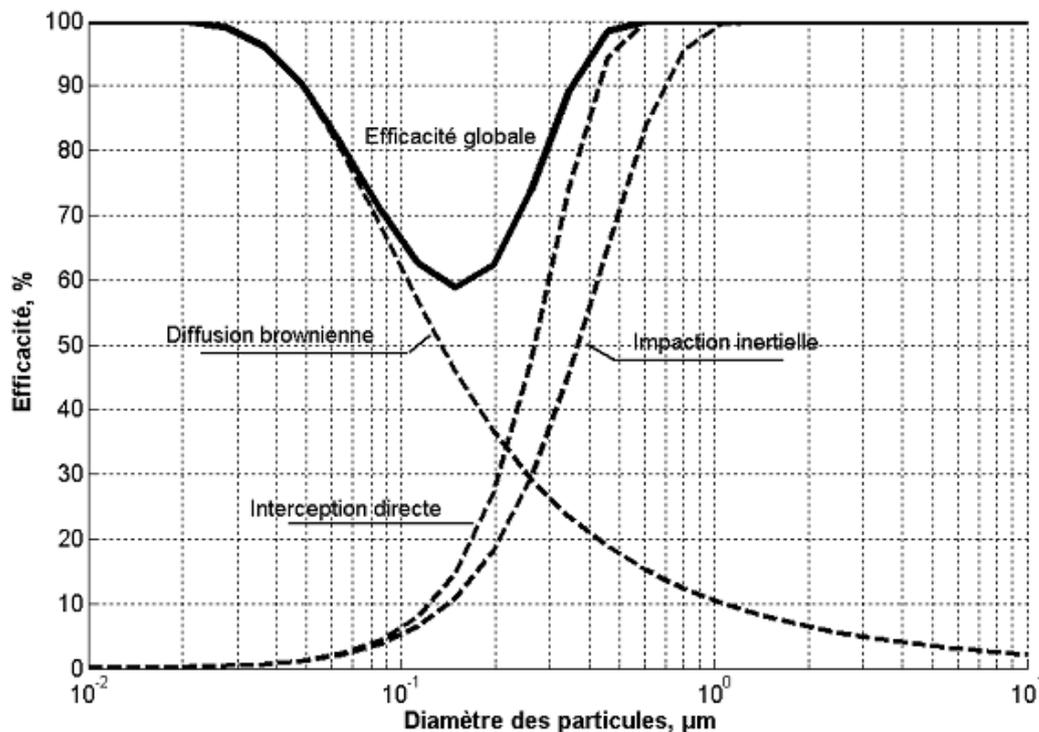


Figure 12 : Efficacités pour chaque mécanisme de capture et totale - Adapté de (Bailly, Clerc-Renaud, et Rutman 2001)

5.1.1.4 Caractéristiques des médias filtrants

5.1.1.4.1 *Matériaux*

Les fibres employées pour la réalisation de médias fibreux filtrants peuvent être de nature variée : fibres organiques d'origine naturelle (coton, lin, chanvre), fibres de cellulose régénérée, fibres synthétiques (polyester, polyéthylène, polyamide ou autres polymères), fibres inorganiques (minérales/céramiques, fibres de verre, fibres métalliques et fibres de carbone).

5.1.1.4.2 *Types de filtres*

Les filtres utilisés en traitement de l'air sont majoritairement dédiés au dépoussiérage. Le choix technologique est principalement régi par les performances souhaitées, les caractéristiques de la pollution à traiter (concentration, débits, granulométrie, température...), Les considérations économiques et logistiques (encombrement, architecture du bâtiment...) (Dickenson 1997).

Concrètement, cela se traduit par une classification des performances en fonction des particules à piéger. La dénomination de leur classe dépend de la méthode de mesure utilisée pour les essais. On classe les filtres à couche poreuse en fonction de leur efficacité (Tableau 2) :

- Filtres à moyenne efficacité (classes G1 à G4) : Filtres plans.
- Filtres à haute efficacité (classes F5 à F9) : Filtres à poches, Filtres plissés.
- Filtres à très haute efficacité ou absolus (classes H10 à H14) : Filtres absolus.

Taille des particules	Exemples de particules	Classe de filtration	Exemples d'applications
Filtre à poussières grossières pour particules > 10 µm	Insectes, fibres textiles et cheveux, sable, cendres en suspension, pollen, spores, poussière de ciment	G1 G2	Pour les applications simples (par ex. protection contre les insectes)
		G3 G4	Préfiltres et filtres pour les installations de protection civiles ; air d'échappement des cabines de peinture et d'aérations de cuisines, etc. ; protection contre l'encrassement des installations de climatisation et compacts (par ex. les appareils de climatisation pour fenêtres, les ventilateurs) ; préfiltre pour les classes de filtration F6 à F8
Filtre à poussières fines pour particules de 1 - 10 µm	Spores, pollen, poussière de ciment, particules provoquant des dépôts de poussières et des taches, bactéries et germes sur des particules hôtes	F5	Filtre d'air d'admission pour des locaux à faibles exigences (par ex. ateliers, entrepôts, garages)
		F5 F6 F7	Préfiltres et filtres de circulation d'air des installations de ventilation ; filtre final dans les installations de climatisation des locaux de vente, grandes surfaces, bureaux et autres locaux de production, préfiltre pour les classes de filtration F9 à H11
	Vapeurs d'huile et suie agglomérée, fumée de tabac, vapeur d'oxyde métallique	F7 F8 F9	Filtre final dans les installations de climatisation des bureaux, locaux de production, centrales de commutation, hôpitaux, centraux informatiques ; préfiltre pour les classes de filtration H11 à H13
Filtre à substances en suspension pour particules < 1 µm	Germes, bactéries, virus, fumée de tabac, vapeur d'oxyde métallique	H10 H11 H12	Filtre final pour des locaux présentant des exigences élevées et très élevées (par ex. des laboratoires, les locaux de production de l'industrie alimentaire, pharmaceutique, de mécanique fine, optique et électronique, ainsi que des locaux médicaux)
		H11	Filtres finaux destinés aux salles blanches de la classe 100.000 ou 10.000
	Vapeurs d'huile et suie en cours de constitution, particules radioactives en suspension Aérosols	H12 H13	Filtres finaux destinés aux salles blanches de la classe 100.000 ou 10.000, filtres finaux dans les installations de protection civile, filtre d'air d'échappement dans les installations nucléaires
	Aérosols	H14 U15 U16	Filtres finaux destinés aux salles blanches de la classe 10 ou 1

Tableau 2 : Classification des filtres

Le plus grand risque avec les filtres est l'encrassement, c'est pourquoi il est fortement indiqué de disposer de préfiltres. En effet plus le pouvoir de filtration est élevé, plus le filtre s'encrasse rapidement. Une maintenance régulière avec changement des filtres est donc nécessaire.

5.1.2 Ionisation et filtration électrostatique

5.1.2.1 Généralités

L'ionisation est la transformation d'un atome ou d'une molécule électriquement neutre en ion, par la perte ou le gain d'un ou plusieurs électrons.

Il existe plusieurs procédés permettant d'ioniser un atome ou une molécule. On distingue par exemple :

- l'ionisation par impact électronique : un faisceau d'électrons accélérés rencontre un atome ou une molécule et lui arrache lors du choc un ou plusieurs électrons,
- l'ionisation par l'action de rayonnements : un atome ou une molécule est soumis à l'action d'un rayonnement de longueur d'onde suffisamment énergétique pour éjecter un électron périphérique.

Les systèmes d'épuration utilisant le principe de l'ionisation utilisent le plus souvent des procédés d'ionisation par impact électronique, dont les deux techniques les plus couramment utilisées sont l'ionisation par décharge couronne (corona) et l'ionisation par décharge à barrière diélectrique (DBD).

La décharge à barrière diélectrique

Une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) est une décharge électrique créée en appliquant une tension alternative élevée aux bornes de deux électrodes séparées par un matériau diélectrique (Figure 13). La présence du diélectrique permet de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge et ainsi d'éviter le passage à l'arc.

Lors de la décharge, les électrons libres naturellement présents dans le milieu vont acquérir de l'énergie sous l'effet du champ électrique appliqué, et permettre ainsi des réactions d'ionisation.

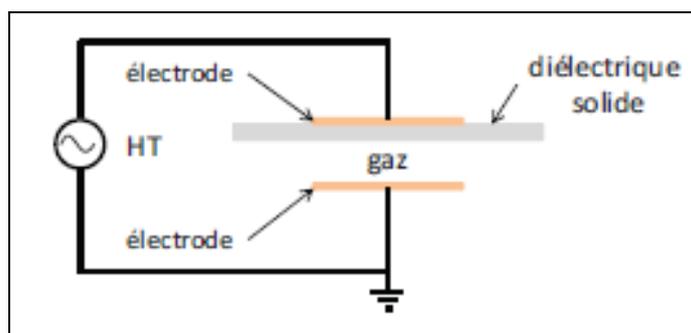


Figure 13 : Configuration classique d'une DBD

Suivant le type d'applications envisagées, plusieurs formes et dispositions du couple électrodes-diélectrique sont utilisées. Les électrodes cylindriques sont plus adaptées au traitement des gaz, alors que les structures avec électrodes planes sont plutôt utilisées pour les problèmes de traitement de surface.

La décharge couronne

L'ionisation par décharge couronne se produit lorsqu'un potentiel élevé est appliqué entre une électrode active, une pointe ou un fil de petit diamètre et une électrode passive, généralement une plaque ou une grille reliée à la terre (Figure 14). La quantité d'ions produits augmente avec la tension appliquée et le nombre d'électrodes. La dispersion des ions est obtenue par répulsion électrostatique.

Une décharge « corona » peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode active.

5.1.2.2 L'ionisation simple ou ionisation négative

L'épuration de l'air par ionisation simple consiste à injecter dans l'air un flux d'ions négatifs produits par des générateurs d'ions, ou ioniseurs. Les électrons libérés dans le générateur sont captés par des molécules de l'air, principalement les molécules d'oxygène pour former des ions négatifs.

Ces ions négatifs se combinent et chargent négativement les particules électriquement neutres en suspension dans l'air. Les particules initialement chargées positivement sont alors neutralisées et acquièrent à leur tour une charge négative. Ces particules chargées négativement se repoussent entre-elles et finissent par se déposer par attraction électrostatique sur les surfaces du bâtiment qui sont chargées positivement (le sol, les murs, meubles, tissus....). Les particules de charges opposées vont s'attirer et former des particules plus lourdes qui vont se déposer sur les surfaces plus rapidement (Luengas *et al.* 2015). Les appareils à ionisation simple ne contiennent pas de dispositif de récupération des particules (Ribot *et al.* 2006).

Il existe plusieurs principes de générateurs d'ions. L'énergie nécessaire à l'ionisation peut être fournie par une source de rayonnement alpha (comme le tritium) ou générée par une source électrique, photoélectrique ou encore à effet thermoélectrique. Les sources radioactives sont interdites dans la plupart des pays en raison de la radioactivité qu'elles émettent.

Les ioniseurs basés sur le principe de la décharge à effet couronne sont parmi les plus répandus des générateurs d'ions dans les appareils de traitement de l'air.

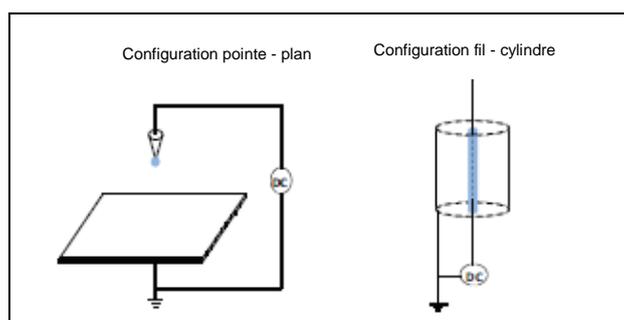


Figure 14 : Configurations géométriques propices à la formation d'une décharge couronne

D'après sa définition, le terme ionisation devrait être considéré comme un terme générique désignant toutes les formes d'exploitation de l'électricité pour le traitement de l'air. Mais en pratique, il est généralement utilisé pour les deux applications ci-dessous (Blondeau *et al.* 2007).

Il existe deux types de systèmes d'épuration utilisant le principe de l'ionisation de l'air : les appareils à ionisation simple et les précipitateurs électrostatiques. Les filtres à particules utilisant le principe de l'ionisation de l'air sont qualifiés de filtres électroniques.

En théorie, ces systèmes visent à précipiter les particules, soit sur les surfaces du bâtiment, soit sur les précipitateurs électrostatiques. Dans la pratique une action sur les molécules gazeuses peut également être observée par l'action des radicaux formés par les liaisons entre les élections libres et l'O₂ (Blondeau *et al.* 2007). Les interactions entre les COV et ces radicaux conduisent à une suite de réactions chimiques en chaîne qui doit conduire à une minéralisation lorsque la réaction est complète. C'est ce qui est recherché dans le plasma décrit dans le chapitre 5.2.1, toutefois ces réactions ne sont pas exclues dans l'ionisation simple.

5.1.2.3 La précipitation électrostatique

Le principe de la précipitation électrostatique consiste à ioniser des particules en suspension dans l'air à l'aide d'une électrode active et à les collecter par l'intermédiaire d'un champ électrique, à l'aide d'électrodes portant une charge électrique opposée à celle des particules ionisées.

L'électrode active peut être un fil ou une électrode placée au centre d'une autre électrode ou de plaques parallèles chargées négativement ou reliées à la terre (Figure 15).

En appliquant une tension au-delà d'un seuil (tension d'allumage de la décharge), une décharge couronne apparaît autour du fil. Cette décharge générée au sein du dispositif produit des ions. Les particules de l'air se chargent lors des collisions avec les ions produits. Les ions de même polarité que l'électrode active traversent l'espace inter-électrodes sous l'action d'un champ électrique continu, en direction de l'électrode de collecte sur laquelle ils viennent se déposer.

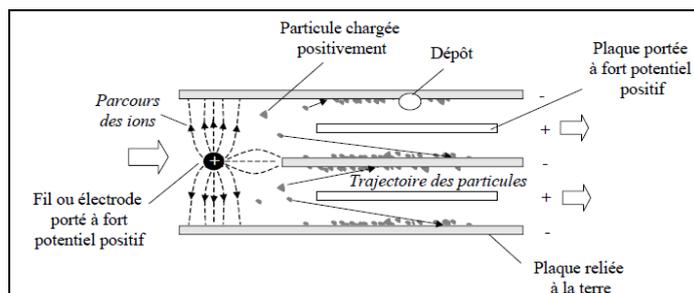


Figure 15 : Exemple de précipitateur électrostatique utilisé en unité de gaine (Ribot *et al.* 2006)

Les précipitateurs électrostatiques se composent d'une unité d'ionisation et d'un système de récupération des particules. Ils peuvent être de géométrie plane ou cylindrique.

5.2 Techniques d'oxydation / destructrices

5.2.1 Plasma

Le plasma est un état de la matière constitué d'un gaz ionisé. Le terme plasma désigne un gaz composé d'un mélange de particules neutres, d'ions positifs (atomes ou molécules ayant perdu un ou plusieurs électrons) et d'électrons libres.

La formation d'un plasma est obtenue lorsqu'un gaz est soumis à un champ électrique de forte intensité ou à un champ électromagnétique intense ou à des températures suffisamment élevées, ou lorsqu'il est bombardé par des particules. Il en résulte une ionisation du gaz.

Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules, le gaz devient alors un fluide très conducteur appelé plasma.

Il convient de distinguer deux types de plasmas : le plasma « froid » ou plasma non-thermique lorsque la température moyenne du gaz reste proche de sa température initiale avant ionisation et proche de la température ambiante, et le plasma chaud dont la température est très élevée.

Dans le domaine de l'épuration de l'air, la technologie du plasma froid est utilisée afin de détruire certains polluants contenus dans les effluents gazeux. Le plasma chaud est peu ou pas utilisé pour l'épuration de l'air intérieur car il nécessite beaucoup d'énergie et n'est par conséquent pas économiquement intéressant pour éliminer des COV à de faibles concentrations (Bahri et Haghghat 2014).

L'utilisation du plasma froid permet la génération d'espèces actives, comme les radicaux libres, capables de décomposer par oxydation certains polluants présents dans l'air.

Le plasma dit « froid » ou plasma non-thermique peut être généré par trois principales techniques :

- l'irradiation par faisceaux d'électrons : un faisceau d'électrons est généré dans une chambre à très basse pression par une cathode thermo-ionique et injecté dans le gaz à ioniser,
- le rayonnement micro-ondes : le gaz est ionisé par un champ électromagnétique,
- les décharges électriques : un plasma est créé entre deux électrodes par application d'une tension.

L'humidité joue un rôle important dans l'efficacité du plasma froid, par exemple la dégradation du formaldéhyde est favorisée par la présence d'humidité, alors que l'inverse est observé pour la dégradation du toluène (Thevenet *et al.* 2014).

5.2.2 Ozonation

La molécule d'ozone (O_3) est formée de trois atomes d'oxygène de formule O_3 . La molécule d'ozone est très réactive et relativement instable. Elle a une tendance naturelle à se décomposer en dioxygène (O_2) et oxygène atomique (O) qui va réagir avec d'autres composés chimiques jusqu'à les décomposer. Cette capacité à céder facilement un atome d'oxygène lui confère un très fort pouvoir oxydant. Le principe de l'épuration par ozonation repose sur cette propriété de l'ozone à pouvoir générer des réactions de décomposition.

L'ozone trouve de nombreuses applications industrielles, en particulier dans le traitement de l'eau, grâce à ses propriétés oxydantes et désinfectantes. Compte tenu de ses propriétés physico-chimiques, l'ozone est également utilisé dans le domaine de l'épuration de l'air pour oxyder et dégrader certains composés organiques.

Le principe de l'épuration de l'air par l'ozone repose sur l'émission dans l'air d'ozone par des générateurs d'ozone ou ozoneurs. Les principales techniques de génération d'ozone reposent sur les deux principes suivants :

- la photodissociation de l' O_2 sous l'action des rayons UV d'une lampe à vapeur de mercure,
- la décharge électrique dans un flux d'air ou d'oxygène (on parle de décharge à effet corona).

La génération d'ozone par décharge électrique est la technique la plus utilisée.

Un générateur de décharge corona est constitué de deux plaques métalliques (électrodes) séparées par une couche d'air et un isolant électrique de constante diélectrique élevée, comme la céramique ou le verre borosilicaté. Une différence de potentiel élevée est appliquée entre les deux électrodes afin de générer une décharge électrique dans la couche d'air. La décharge électrique créée (décharge-corona) provoque la dissociation de la molécule d'oxygène et la formation de

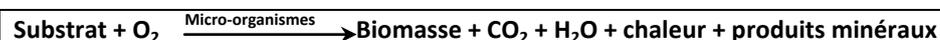
deux radicaux d'oxygène. Ces radicaux formés se combinent avec les molécules d'oxygène pour former la molécule d'ozone.

Les systèmes d'épuration de l'air utilisant des ozoneurs revendiquent des capacités à éliminer les odeurs et les micro-organismes.

5.2.3 Filtration biologique

La biofiltration est une technique de traitement qui appartient à la famille des procédés de traitement biologique. Ces procédés sont basés sur la capacité de certains micro-organismes à métaboliser les polluants.

Le principe général du traitement est décrit par la réaction d'oxydation exothermique des composés présents dans l'effluent gazeux conduisant à la formation de biomasse, d'eau, de dioxyde de carbone et de produits minéraux.



La biofiltration est à ce jour, parmi les techniques biologiques de traitement d'air, la technique biologique ayant fait l'objet du plus grand nombre d'applications industrielles. Depuis quelques années, des travaux portent sur son utilisation en traitement de l'air intérieur (Lu *et al.* 2010, Ondarts 2008, Ondarts *et al.* 2012, Wang et Zhang 2011). Ses principales caractéristiques sont détaillées ci-dessous.

5.2.3.1 Le procédé

La biofiltration (Figure 16) est une technique caractérisée par sa relative simplicité de mise en œuvre. En effet, cette technique consiste à forcer le passage du gaz à traiter au travers d'un matériau de garnissage colonisé par les micro-organismes épurateurs maintenu à un taux d'humidité optimal.

Les biofiltres sont des réacteurs garnis d'un matériau support sur lequel des microorganismes épurateurs se développent sous forme de biofilm. Le traitement des effluents gazeux par biofiltration repose sur une première étape de transfert des polluants vers le biofilm, où ils sont alors oxydés par la biomasse immobilisée. La nature du matériau de garnissage, le mode d'inoculation, le taux d'humidité et le pH font partie des paramètres opératoires déterminants, qui influencent à la fois les performances épuratoires et les communautés microbiennes impliquées dans les biofiltres.

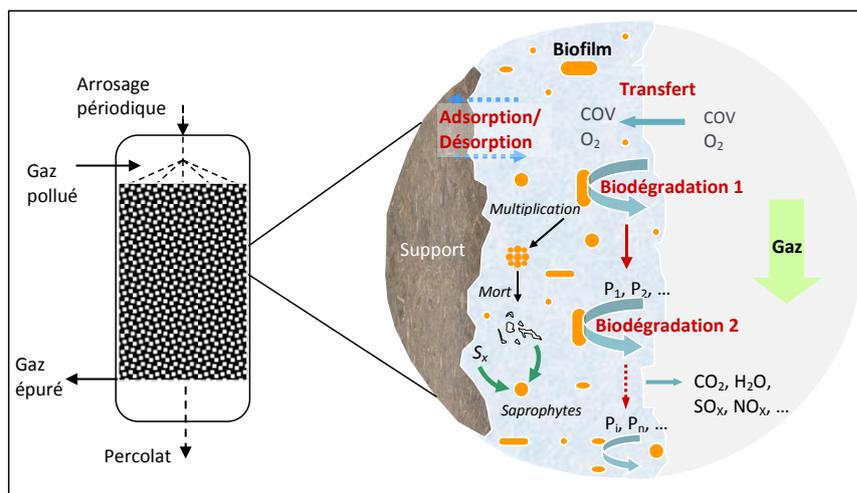


Figure 16 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un biofiltre et les principaux mécanismes impliqués dans la biofiltration (P₁, P_n : sous-produits et intermédiaires de réaction. S_x : autre substrat provenant du support organique, de la matrice EPS ou de la mort cellulaire). D'après Deshusses (1997) et Fanlo (1998)

Les microorganismes peuvent provenir du matériau filtrant, d'une suspension de boues activées ou d'un inoculum spécialisé introduit avant la mise en route du biofiltre. L'inoculation du matériau filtrant avec une microflore complexe acclimatée aux polluants est une pratique courante qui permet d'accélérer le démarrage du biofiltre. Les boues activées issues de stations d'épuration des eaux usées sont aussi très souvent utilisées. Elles renferment une grande diversité de microorganismes potentiellement capables de dégrader une large variété de polluants.

Afin d'optimiser les mécanismes de transfert de gaz et d'adsorption, certains paramètres doivent être pris en compte lors de la mise en œuvre du biofiltre.

5.2.3.2 Paramètres opératoires

5.2.3.2.1 Le matériau de garnissage

Plusieurs types de matériaux sont utilisés comme support de biofiltration. Le choix du matériau est un paramètre clé pour la durée de vie du réacteur, le développement microbien, l'efficacité de traitement et le coût du procédé. Le choix du matériau support se base par conséquent sur l'examen de critères hydrodynamiques, biologiques, physico-chimiques, et économiques.

La nature du matériau support (organique ou inorganique) ainsi que sa taille ont une incidence directe sur la résistance mécanique du support. Si le matériau est constitué de particules trop fines, il peut être à l'origine de problèmes de colmatage. Aussi, des additifs tels que les billes de verre ou des copeaux de bois peuvent-ils être mélangés au matériau. Par conséquent, il possède un comportement hydrodynamique adapté.

La capacité de rétention d'eau constitue également un paramètre important pour le développement et le maintien du biofilm.

La porosité permet d'augmenter non seulement la surface spécifique et les propriétés de sorption du matériau support mais également offre des habitats privilégiés et diversifiés qui favorisent la colonisation par les microorganismes.

Les aspects économiques ne pouvant pas être négligés, le coût du matériau, ainsi que son espérance de vie doivent également être considérés.

Pour répondre à toutes ces attentes, la composition du matériau support peut être complexe. Les matériaux les plus couramment utilisés sont la tourbe ou le compost comme support de base. Le charbon actif est souvent utilisé comme agent tampon vis à vis des fluctuations de concentrations en polluants en entrée du réacteur.

De nombreux travaux visent à améliorer ou à mettre au point un matériau adapté à la biofiltration, étant donné que la nature de celui-ci influe largement sur les performances du système.

5.2.3.2.2 Paramètres physico-chimiques

Les principaux paramètres physico-chimiques influant sur les performances de la biofiltration sont listés ci-après.

5.2.3.2.2.1 Le taux d'humidité

Le taux d'humidité au sein du biofiltre (généralement 50 à 60% en poids) constitue le facteur qui a le plus grand impact sur l'activité de dégradation et par conséquent sur le fonctionnement et l'efficacité du biofiltre. Les micro-organismes se développent en effet dans la phase liquide, et un taux d'humidité important permet d'augmenter la solubilisation des composés à traiter (première étape du mécanisme) ainsi que leur temps de séjour au sein du biofiltre, favorisant ainsi l'activité microbienne de dégradation. La régulation du taux d'humidité se fait aussi bien en humidifiant l'air entrant dans le réacteur qu'en utilisant un arrosage de surface. Le taux d'humidité préconisé est généralement évalué à 50% de la capacité de rétention du matériau.

5.2.3.2.2.2 Equilibre nutritionnel et contrôle du pH

Pour de faibles charges en composés odorants, les nutriments nécessaires aux micro-organismes sont généralement présents en quantité suffisante dans les garnissages usuels de biofiltres. Pour des charges élevées, et dans le cas de l'utilisation de matériaux synthétiques, un apport en minéraux *via* la solution d'humidification est souvent nécessaire. Par ailleurs, la plupart des biofiltres sont conçus pour fonctionner dans une gamme de pH proche de la neutralité comprise entre 6 et 8.

5.2.3.2.2.3 Contrôle de la température

La plupart des biofiltres fonctionnent avec des communautés microbiennes se développant dans une gamme de températures de 20 à 45°. C'est pourquoi il est recommandé de maintenir la température du flux d'air pollué entrant dans le réacteur entre 20 et 40°C. Néanmoins, dans cette gamme de température, l'activité enzymatique augmente avec la température.

5.2.3.2.2.4 Pré-traitement des gaz

Il est parfois nécessaire d'envisager une préfiltration du gaz, plus particulièrement lorsque la concentration en poussières et aérosols est supérieure à 10-20 mg.m⁻³.

5.2.3.3 Bilan

Le coût d'installation d'un biofiltre dépend du volume du gaz à traiter, de la nature et de la concentration en polluants, de la localisation de la source de pollution, des équipements et unités nécessaires pour le prétraitement de l'air en amont du biofiltre auxquels se rajoutent des éléments périphériques (canalisations, filtres, échangeurs, ventilateurs...). Les coûts de fonctionnement d'une unité de biofiltration dépendent de la consommation énergétique, de la nature du matériau filtrant et de sa durée de vie, de la consommation d'eau et d'éléments nutritifs et de la maintenance des différents équipements de l'unité.

Même si chaque installation répond à des critères spécifiques (nature de l'effluent gazeux à traiter, localisation de la source de pollution, critères inhérents au lieu d'implantation), toute installation de biofiltration se doit de respecter les différents points discutés ci-dessus.

Dans le cas de la mise en œuvre de la biofiltration en traitement de l'air intérieur, des considérations particulières doivent être prises en compte, comme en particulier le très faible niveau des concentrations de polluants à éliminer ou encore la possible génération d'aérosols microbiens.

5.2.4 Catalyse/photocatalyse

5.2.4.1 Photocatalyse

5.2.4.1.1 Généralités

Objet d'un intérêt croissant depuis quelques années, la photocatalyse est très souvent considérée comme une technique universelle, simple, « non polluante » et extrêmement efficace. Elle présente de nombreux avantages dont celui d'opérer à température ambiante et à pression atmosphérique. Si les conditions opératoires optimales sont réunies, les produits issus de la minéralisation complète des polluants à dégrader, sont l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote et d'autres espèces minéralisées qui ne nécessitent, *a priori*, pas de traitements ultérieurs.

La photocatalyse a montré ses capacités oxydantes sur un large panel de composés tels que les colorants (Li *et al.* 2006, Wang, Silva, et Faria 2007), les pesticides (Herrmann et Guillard 2000), les polluants organiques des eaux usées (Hamill, Weatherley, et Hardacre 2001, Bousselmi *et al.* 2000), les substances chlorées (Alberici *et al.* 1998, Gérardin *et al.* 2013) et bien d'autres COV (Cloteaux *et al.* 2014, Zuo *et al.* 2006, Kim *et al.* 2002) (Figure 17). Elle est en outre, de plus en plus utilisée à des fins de désinfection, touchant différents microorganismes que ce soit des bactéries, des champignons ou même des virus (Faure *et al.* 2011).

Cette vision, idéaliste voire utopique, est fréquemment employée pour présenter cette technique. Toujours est-il que les conditions optimales menant à la minéralisation complète des polluants sont rarement rassemblées et que des sous-produits de dégradation, parfois plus toxiques que les polluants à éliminer initialement, sont alors formés. Par conséquent, la question de l'innocuité de la photocatalyse reste complète à ce jour et demande une meilleure prise en compte du problème par la communauté scientifique.

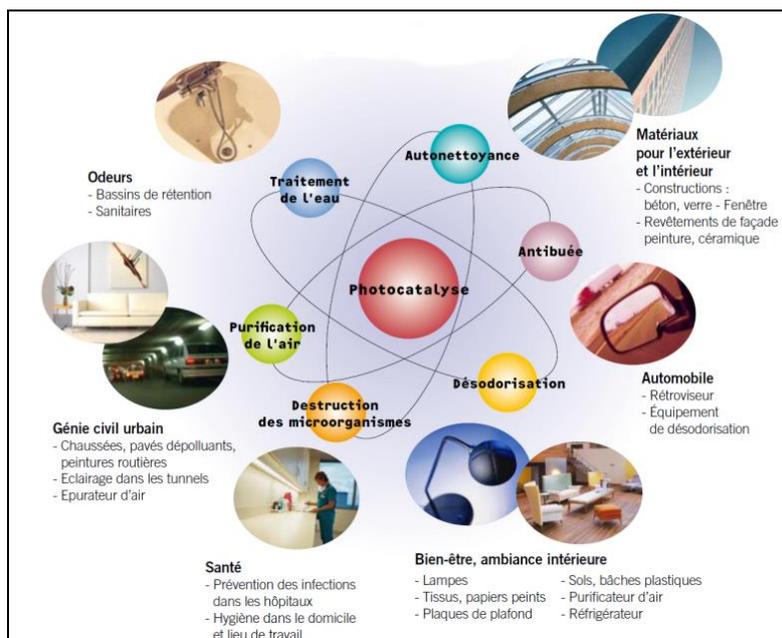


Figure 17 : Applications possibles de la photocatalyse (source : Fédération française de la photocatalyse)

5.2.4.1.2 Principe

La photocatalyse est une réaction de catalyse hétérogène où le catalyseur est activé par un rayonnement lumineux d'énergie suffisante. Un catalyseur idéal est une substance qui augmente notablement la vitesse d'une réaction chimique sans être elle-même transformée de façon définitive. L'activité catalytique dépend à la fois du degré de dispersion des agents actifs du catalyseur, de sa forme, de sa structure poreuse, de sa surface spécifique. En photocatalyse, les catalyseurs sont des semi-conducteurs tels que les oxydes ou les sulfures (TiO_2 , ZnO , CeO_2 , CdS , ZnS , etc.). Le dioxyde de titane est le catalyseur le plus utilisé en photocatalyse de par son faible coût et ses performances élevées (Mills et Le Hunte 1997). Il est pris comme exemple pour présenter le mécanisme photocatalytique dans ce qui suit.

La réaction de catalyse hétérogène est classiquement décomposée en sept étapes (Figure 18) :

- Étape 1. La migration diffusionnelle des réactifs de la phase fluide vers la surface du grain de catalyseur : diffusion externe.
- Étape 2. La migration diffusionnelle des réactifs dans les pores du grain : diffusion interne.
- Étape 3. L'adsorption des réactifs.
- Étape 4. La réaction de surface ou superficielle.
- Étape 5. La désorption des produits de réaction.
- Étape 6. La diffusion interne des produits.
- Étape 7. La diffusion externe des produits.

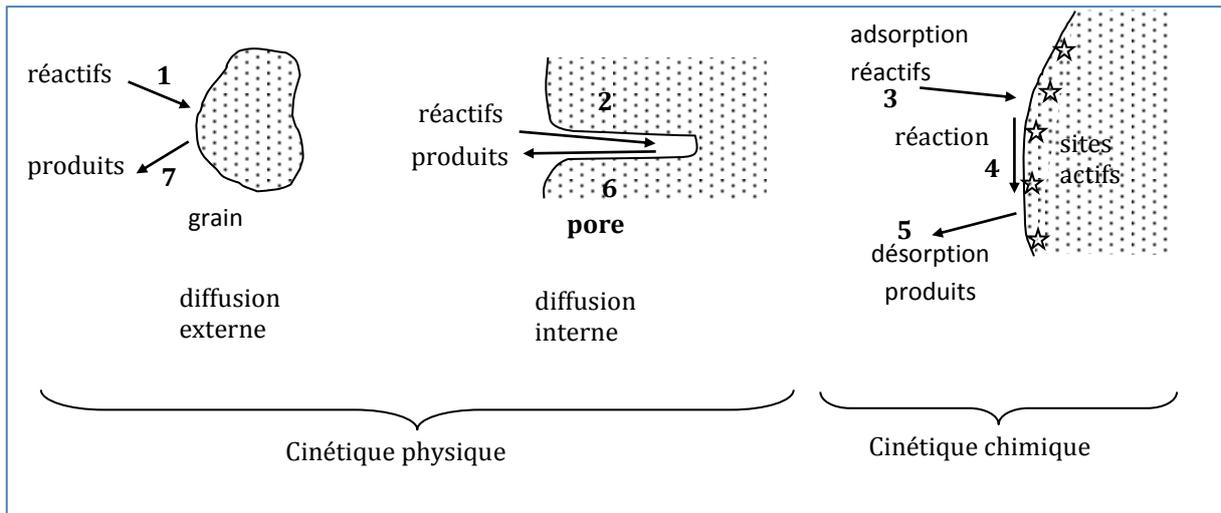


Figure 18 : Les différentes étapes d'une réaction de catalyse hétérogène (Cloteaux 2015)

On parle de limitation par la cinétique physique, ou de régime diffusionnel, lorsque ce sont les étapes de transfert interne ou externe qui limitent la vitesse de dégradation. Quand ce sont les étapes d'adsorption, de désorption ou la réaction en surface qui sont les étapes les plus lentes, on parle de limitation par la cinétique chimique ou de régime chimique. Mehrotra, Yablonsky, et Ray (2003) ont mis en évidence des phénomènes de limitation par le transfert de matière et de lumière lors de l'utilisation de suspension de particules de TiO_2 pour des charges en catalyseur élevées. En faisant varier les conditions expérimentales, ils ont pu identifier les domaines de limitation chimique, de limitation par le transfert interne et de limitation par le transfert de lumière.

5.2.4.1.3 Mécanisme photocatalytique (Cloteaux 2015)

Du point de vue de l'ingénieur, la photocatalyse peut être vue comme une « boîte noire » avec comme données d'entrée la masse de catalyseur, le flux de photons, la concentration en polluant, etc. (Figure 19). Il est alors nécessaire de réaliser une étude paramétrique pour établir une loi expérimentale reliant la cinétique de réaction aux grandeurs principales. Cette solution peut être satisfaisante pour le dimensionnement de procédés mais se révèle insuffisante pour comprendre les phénomènes physico-chimiques qui ont réellement lieu dans le catalyseur lorsqu'il est exposé à un flux lumineux.

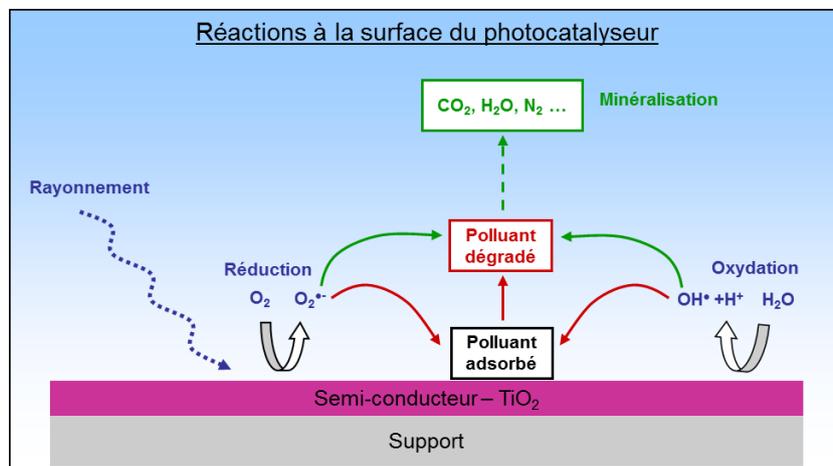


Figure 19 : Schéma simplifié du mécanisme photocatalytique avec du TiO₂

Les principales espèces impliquées dans le processus de dégradation photocatalytique sont :

- **Les trous** : Ils sont les principaux oxydants lors des réactions photocatalytiques. Ils seraient piégés en surface en moins d'une picoseconde et réagiraient ensuite fortement avec les espèces adsorbées.
- **Les radicaux OH[•]** : Ils sont formés par l'oxydation des hydroxydes ou de l'eau. Ils jouent un rôle important dans les premières étapes d'oxydation en particulier pour les composés qui s'adsorbent faiblement sur le dioxyde de titane. La durée de vie d'un radical OH[•] est d'environ 10 µs. (Boehm et Herrmann 1967) ont estimé le nombre maximal de groupements hydroxyles à la surface entre 5 et 15 par nm².
- **Les radicaux O₂^{•-}** : Les cas où le radical superoxyde est l'espèce qui réagit directement avec le polluant cible sont moins nombreux que pour h⁺ et OH[•]. Cependant il s'agit de l'oxydant clé pour la dégradation de certains composés (Fujishima, Zhang, et Tryk 2008).
- **L'oxygène singulet ¹O₂** : L'oxygène singulet peut-être formé par la réaction d'un radical superoxyde et d'un trou. Sa durée de vie est d'environ 2 µs et dépend de l'environnement.
- **Le peroxyde d'hydrogène.**
- **L'oxygène.**

En réalité, le mécanisme de photocatalyse est probablement plus complexe et dépend de nombreux autres paramètres. La durée de vie des radicaux formés va dépendre du milieu environnant (air ou eau), des conditions d'irradiation (UV-A, UV-visible ou spectre solaire). Le transport des charges est fonction de la nature du catalyseur, de la forme cristalline et de la direction de transport par rapport à la structure cristalline.

5.2.4.1.4 Applications commerciales

Les applications industrielles de la photocatalyse se multiplient considérablement depuis quelques années. A titre d'exemple, certains grands groupes appliquent les propriétés autonettoyantes, conférées par la photocatalyse à certains matériaux, par exemple : du verre autonettoyant, des revêtements routiers et des murs antipollution ou encore du ciment autonettoyant et dépolluant. En termes de traitement de l'air ambiant¹⁰, de nombreuses PME proposent des gammes d'épurateurs d'air autonomes en présentant leurs appareils comme universels, hautement efficaces, sans se soucier aucunement de l'innocuité des sous-produits potentiellement créés. Ils associent généralement des techniques de filtration, d'adsorption sur charbon actif et de dégradation photocatalytique. Les polluants ciblés étant multiples (fumées de cigarettes, odeurs de cuisson, COV, microorganismes...), ces épurateurs d'air sont installés dans des lieux publics (bars, restaurants, cafés), des transports collectifs, des lieux médicaux (salles d'attentes, salles opératoires, hôpitaux, ambulances), des crèches, des écoles maternelles ou encore des salles de réunions.

Généralement, ce type d'appareils est composé d'un corps cylindrique métallique dans lequel est placé un média photocatalytique éclairé par une série de tubes fluorescents émettant dans le domaine des UV-A. Le média photocatalytique est composé, entre autres de particules de dioxyde de titane et d'un liant à base de silice. Un ventilateur permet de faire circuler l'air dans l'appareil

¹⁰ Air ambiant / air extérieur : En référence à la réglementation relative à la surveillance de la qualité de l'air (code de l'environnement – article Articles R221-1 à R221-3), le terme « air ambiant » est employé pour désigner l'air extérieur en distinction avec l'air intérieur. Dans le document, la désignation « air extérieur » correspondra à « air ambiant »

avec un débit variable selon les modèles et les fabricants et peut atteindre plusieurs centaines de $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Le temps de séjour dans ces appareils est habituellement inférieur à la seconde et l'air s'écoule tangentiellement au support photocatalytique (flux léchant).

5.3 UV

5.3.1 Principe du traitement de l'air par photochimie

5.3.1.1 Généralités

La photochimie est le domaine qui relève des processus chimiques induits par la lumière et les radiations qui la composent. Les possibilités de la photochimie sont très vastes et les réactions photochimiques sont multiples et diverses comme peuvent l'être les réactions chimiques. La lumière permet des transformations nouvelles, accélère des réactions déjà connues ou encore aide à les orienter. Dans le domaine de la chimie organique, la lumière peut être un agent de synthèse. La lumière peut également être un agent de destruction de la matière comme pour le cas dans les réactions photolytiques.

Les applications industrielles de la lumière pour la synthèse sont peu nombreuses. En revanche, l'utilisation de celle-ci composée de radiations relativement énergétiques telles que les ultraviolets (UV) se développe comme moyen d'épuration d'effluents liquides ou gazeux. Si la lumière permet d'induire et de promouvoir des réactions, elle est actuellement couramment employée à des fins germicides.

5.3.1.2 Applications germicides des UV

L'action germicide des ultraviolets est essentiellement localisée au niveau des molécules d'ADN et d'ARN. Cela conduit à un blocage de la réplication du matériel génétique, à l'arrêt de la multiplication cellulaire et à la mort des cellules. Si un micro-organisme ne peut pas se reproduire, il est considéré comme mort (Truc 2007).

Qu'ils s'agissent d'effluents liquides ou gazeux, les sources lumineuses utilisées en désinfection par UV sont des lampes à vapeur de mercure, métal choisi car il présente une raie de résonance à 253,7 nm, ce qui est très proche de la bande d'efficacité optimale pour la désinfection. L'apparence et le fonctionnement des lampes UV sont similaires à ceux de lampes fluorescentes. Chaque lampe est placée dans une gaine de quartz, transparente aux rayonnements UV. Une décharge électrique entre les deux électrodes de la lampe provoque l'excitation des atomes de mercure, qui émettent des radiations.

Il existe essentiellement deux types de lampes utilisés en traitement de désinfection des eaux résiduaires : les lampes basse pression et les lampes moyenne pression. La puissance UVC dissipée par une lampe moyenne pression est plus importante que celle fournie par une lampe basse pression, mais son rendement (puissance UVC/puissance consommée) est moindre (Truc 2007).

5.3.1.3 Propriétés photolytiques des UV

La mise en œuvre de radiations lumineuses pour le traitement d'effluents gazeux ou liquides afin d'en décomposer les substances indésirables n'est pas très répandue en particulier pour des composés faiblement concentrés ou pour des molécules qui absorbent peu aux longueurs d'ondes employées.

Rappelons que ce procédé consiste en un processus élémentaire photochimique qui conduit à la transformation chimique de molécules après absorption d'une radiation de longueur d'onde

convenable (Scacchi *et al.* 1996), c'est-à-dire une longueur d'onde absorbée assez faible pour que l'énergie soit suffisante pour induire la dissociation de la molécule.

Appliquée au traitement de composés organiques volatils (COV), cette technique de photooxydation présente un intérêt lorsque que des radiations très énergétiques sont mises en œuvre. En effet, des radiations de longueurs d'onde inférieures à 200 nm permettent de produire de l'ozone à partir de l'oxygène présent dans l'air à traiter. Ainsi, l'oxydation des composés organiques en présence à la fois d'UV lointains et d'ozone présente une efficacité plus importante que celle qui serait obtenue en présence d'UV moins énergétiques seuls.

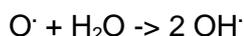
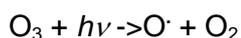
Les mécanismes qui interviennent dans un tel processus intègrent donc une photolyse « directe » et la combinaison de la photolyse et de l'oxydation chimique. La prédominance des différents mécanismes du processus dépend non seulement des propriétés de la source lumineuse (longueur d'onde, intensité), de la concentration et de la nature du composé organique mais également de la concentration en ozone et de l'humidité relative.

La photolyse directe

Le rendement de la photolyse directe est proportionnel au nombre de photons absorbés par unité de temps et dépend également du rendement quantique global de la réaction. De manière schématique, le rendement quantique global correspond au rapport du flux de molécules décomposées par le flux de photons absorbés. Dans le cas de faibles concentrations de COV, l'absorption des radiations est proportionnelle à la concentration en polluants.

L'oxydation chimique

Les processus oxydants observés dans ce contexte sont induits principalement par l'ozone et les radicaux hydroxyles. Ces radicaux sont générés pour une large proportion par la décomposition de l'ozone selon le mécanisme suivant :



Le rendement quantique de la décomposition de l'ozone est dans ce cas dépendant de la présence de vapeur d'eau. L'oxydation des espèces organiques présentes est réalisée par les radicaux hydroxyles.

5.3.2 Applications

A ce jour, les applications commerciales de cette technologie dans le domaine tertiaire ou dans l'habitat concernent principalement l'élimination d'aérosols microbiens avec la mise en œuvre de radiations UVC. En revanche, rares voire inexistants sont les dispositifs destinés à décomposer les COV par photolyse directe ou par la combinaison « photolyse – oxydation chimique ». Néanmoins, la pertinence de cette dernière appliquée au traitement des COV a été démontrée en laboratoire sans toutefois aborder la question des sous-produits induits (Wang et Ray 2000).

5.4 Réglementation relative aux dispositifs d'épuration de l'air intérieur

5.4.1 En France

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis d'identifier de réglementation propre à l'utilisation ou la mise sur le marché de systèmes d'épuration de l'air intérieur en France.

5.4.2 A l'international

Aux Etats-Unis, l'Agence de protection de l'environnement de l'Etat de Californie (Cal EPA - California Air Resource Board – CARB) a réglementé la mise sur le marché des purificateurs d'air en septembre 2007. Ainsi, depuis le 18 octobre 2010, les appareils commercialisés et/ou importés en Californie, ne doivent pas émettre plus de 0,05 ppm d'ozone. Les dispositifs à intégrer dans des gaines de ventilation (systèmes dits « in duct ») ou à utilisation industrielle ne sont pas concernés par cette réglementation (CARB 2007).

Tous les purificateurs d'air font l'objet d'une certification par le CARB et le label de certification, ainsi que les normes ANSI/UL 507 (Septembre 2007) et ANSI/UL 867 (december 2007), en fonction du type d'appareil doivent figurer sur l'emballage :

- Les appareils fonctionnant sur le principe de la filtration mécanique, qui n'émettent pas d'ozone, ou très peu, ne font pas l'objet de tests d'émissions d'ozone. Le CARB vérifie le principe de fonctionnement de l'appareil, ainsi que le respect de la norme ANSI/UL 507.
- Les autres appareils doivent être testés suivant la norme ANSI/UL 867 ou la norme ANSI/UL 507. Le test d'émission d'ozone doit être fait suivant la section 37 de la norme ANSI/UL 867.
- Les appareils dont la fonction première n'est pas l'épuration de l'air doivent suivre les normes qui leur sont applicables pour la sécurité électrique, ainsi que la section 37 de la norme ANSI/UL 867 pour l'émission d'ozone.

Par ailleurs, le CARB met à disposition des consommateurs sur son site internet plusieurs informations comme la liste des appareils certifiés, une liste d'appareils à éviter ainsi que des conseils pour bien choisir son épurateur, et des liens vers des articles institutionnels ou de la presse sur les épurateurs d'air (CARB 2015).

A l'exception de l'état de Californie, sur la base de la recherche bibliographique réalisée, il ne semble pas y avoir d'autre pays qui ait implémenté une réglementation spécifique aux épurateurs d'air intérieur.

5.5 Normes

5.5.1 Normes françaises

Trois normes ont été publiées sur des méthodes d'essais qui permettent d'évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air : efficacité d'épuration vis-à-vis de polluants, calcul du débit d'air épuré, mesure de la puissance acoustique. Elles sont succinctement présentées ci-dessous.

- La norme NF B 44-200 de mai 2016 : Epurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles - Méthodes d'essais - Performances intrinsèques - Epurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles - Méthodes d'essai - Performances intrinsèques

L'objectif de cette norme est de définir des méthodes d'essais pour évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes pour application tertiaire et résidentielle. Elle est également applicable aux climatiseurs individuels autonomes qui présentent une fonction d'épuration d'air.

Les méthodes d'essais définies dans cette norme permettent de mesurer l'efficacité des épurateurs vis-à-vis de polluants d'essais qui représentent les :

- gaz (mélange d'acétone, d'acétaldéhyde, de formaldéhyde, d'heptane et de toluène)
- microorganismes (bactérie - *Staphylococcus epidermidis* et champignon - *Aspergillus niger*),
- allergènes (chat Feld 1 – *Felis domesticus* 1),
- particules inertes (particules de DiEthylHexylSebacate – DEHS, de 0,3 à 0,5 µm).

La norme permet également de mesurer certains produits intermédiaires de réactions (ozone, monoxyde de carbone, monoxyde d'azote, dioxyde d'azote) ainsi que la puissance acoustique de l'épurateur.

Les essais sont conduits sur un banc d'essai simulant un passage unique des polluants dans l'épurateur.

L'exploitation des résultats des essais permet de calculer le débit d'air épuré de l'épurateur.

Cette norme est applicable quelle que soit la technique d'épuration. Elle peut être complétée par les deux normes suivantes pour les appareils fonctionnant sur le principe de la photocatalyse.

- La norme XP B44-013 de décembre 2009 : Photocatalyse - Méthode d'essais et d'analyses pour la mesure d'efficacité de systèmes photocatalytiques pour l'élimination des composés organiques volatils/odeurs dans l'air intérieur en recirculation - Test en enceinte confinée

Cette norme décrit les méthodologies à mettre en œuvre, au niveau du laboratoire en enceinte confinée, pour tester des prototypes ou des systèmes commerciaux d'épuration d'air ayant un débit maximal de 1 000 m³/h dans le cadre de l'épuration de l'air intérieur par photocatalyse. Elle est applicable au traitement des atmosphères représentatives de l'air à l'intérieur des bâtiments et des lieux de travail. Le protocole est applicable uniquement à des systèmes purement photocatalytiques ou à des systèmes mixtes contenant une fonction photocatalytique. Cette fonction photocatalytique est mise en évidence par vérification de la minéralisation d'un mélange de COV modèle, décrit ci-dessous, en CO₂.

Pour l'air intérieur, les essais sont conduits avec un mélange d'acétone, d'acétaldéhyde, d'heptane et de toluène. Deux concentrations sont à tester, l'une pour la recherche de sous-produits de réaction (COV, ozone et aldéhydes) et l'autre pour la mise en évidence de la photocatalyse avec le suivi de minéralisation des COV en CO₂.

Les essais sont conduits dans une chambre d'essai d'au moins 1 m³.

La norme prévoit la possibilité de mesurer l'efficacité olfactive du système.

- La norme XP B44-011 de décembre 2009 : Photocatalyse - Méthode d'essai pour l'évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NO_x - Méthode à un seul passage en mode tangentiel

Cette norme expérimentale spécifie une méthode d'évaluation de l'activité de matériaux photocatalytiques pour la dégradation du monoxyde et du dioxyde d'azote gazeux lors de l'exposition de l'échantillon successivement à une source lumineuse UVA et à une source visible. Elle est destinée à tous types de matériaux photocatalytiques testés en flux tangentiel à vitesse modérée et pour des concentrations en oxydes d'azote modérées. La géométrie des échantillons de test ainsi que les moyens analytiques et les paramètres de l'essai sont définis.

5.5.2 Normes à l'étranger

Deux normes étrangères ont été recensées, l'une aux Etats-Unis (ANSI/AHAM AC-1-2002 avril 2002) et l'autre au Japon dans le rapport de (Ribot *et al.* 2006) sur la mise en place du protocole de qualification des appareils d'épuration d'air. en 2006. Les recherches complémentaires n'ont pas permis d'identifier d'autres normes.

- Association of Home Appliance Manufacturers – Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Cord-Connected Room Air Cleaners (ANSI/AHAM AC-1-2002) (USA) (avril 2002)

Cette norme s'applique aux épurateurs domestiques portables utilisant différentes techniques de filtration particulaire (filtre à fibres (medium), électrostatique, ioniseur...).

La méthode d'essais permet d'évaluer les appareils et de les comparer entre eux.

Le principe d'un essai consiste à installer l'épurateur dans une chambre expérimentale étanche et propre, de polluer l'air de la chambre puis de mesurer l'aptitude de l'épurateur à faire diminuer la concentration en polluants lors de son fonctionnement.

La chambre expérimentale a un volume de 1000 ft³ (2,8 m³) et doit être étanche de telle sorte que le renouvellement de l'air ne soit pas supérieur à 0,03 vol/h (mesuré par gaz traceur par exemple). Trois polluants d'essais différents sont décrits ; ils doivent être utilisés séparément :

- Poussière d'Arizona Fine (ISO 12103-1, poussière A2).
- Fumée de tabac (diamètre des particules compris entre 0,09 et 1 µm).
- Pollens (diamètre compris entre 5 et 11 µm).

La température de l'air de la chambre doit être égale à 21 °C ± 1,5 °C et l'humidité relative doit être égale à 40 % ± 5 %. La chambre est connectée à une boucle pour la recirculation de l'air, celui-ci est filtré à l'aide d'un filtre HEPA afin d'assurer la propreté de l'air de la chambre préalablement au début de l'essai.

Le résultat est exprimé en débit d'air épuré (CADR : *Clean Air Delivery Rate*) qui est le débit d'air propre (dépourvu de polluant) avec lequel il faudrait ventiler la chambre expérimentale pour obtenir le même résultat (décroissance de la concentration en polluant) qu'avec l'épurateur d'air.

- Japan Electrical Machinery Association Standard (JEM 1467) au Japon : Purificateurs d'air à usage domestique (mars 1995).

Cette norme permet d'évaluer les performances de deux fonctions des épurateurs : la collecte des poussières et la désodorisation.

- Collecte des poussières

L'essai doit être réalisé dans une pièce d'un volume de 20 à 30 m³ avec comme source de polluant de la fumée de cigarette (de marque Mild Seven). L'étanchéité de la pièce doit être telle que la concentration en poussières après 30 minutes est supérieure à 80 % de la valeur initiale. La concentration initiale, avant mise en route de l'épurateur, doit être comprise entre 1 et 5 mg/m³. Après la mise en fonctionnement de l'épurateur, l'essai se poursuit jusqu'à ce que la concentration en poussières soit égale à un tiers de la valeur initiale.

La méthode d'essais décrite par la norme JEM 1467 permet de déterminer le débit d'air et le débit d'air épuré de l'épurateur, à l'état initial (appareil neuf) et après qu'il ait été encrassé avec de la fumée de tabac.

- Essais de la fonction désodorisation

Pour les essais de désodorisation, l'épurateur est installé dans une enceinte d'un volume de 1 m³, et les trois gaz suivants sont étudiés : ammoniac, acétaldéhyde et acide acétique. Ces gaz sont générés par la combustion de 5 cigarettes de marque Mild Seven. Préalablement à l'essai proprement dit, l'enceinte est polluée en faisant fonctionner un fumeur à cigarettes.

Lorsque l'épurateur ne fonctionne pas, la décroissance naturelle doit être telle qu'après 1 heure la concentration résiduelle en gaz est au moins égale à 70 % de la valeur initiale. L'épurateur d'air est mis en route après la combustion des cigarettes et la concentration résiduelle en gaz est mesurée après 30 minutes de fonctionnement de l'épurateur. Le résultat est exprimé en taux d'élimination des polluants pour chacun des trois gaz.

La pondération attribuée aux différents gaz tient compte du seuil minimal qui est la concentration minimum détectée par l'homme.

5.6 Méthodes d'essais non normalisées / Labels

5.6.1 Air intérieur contrôlé de l'association de recherche clinique en allergologie et asthmologie (ARCAA 2016)

5.6.1.1 Missions de l'ARCAA

L'ARCAA a été créée en 2006 au sein du Syndicat Français des Allergologues (SYFAL) dont les objectifs décrits dans les statuts sont :

- Promouvoir l'allergologie, effectuer des études cliniques, épidémiologiques ou autres en allergologie et en asthmologie,
- Contribuer à la bonne pratique de l'allergologie,
- Informer les médecins, personnels para-médicaux, patients, associations de patients sur les allergies.

Dans le cadre de ces missions, l'ARCAA a mis en place deux labels « allergènes contrôlés » et « air intérieur contrôlé », qui sont délivrés par son comité d'approbation HQE-A (Haute Qualité Environnementale pour allergiques). Ces labels peuvent concerner des détergents, des fibres textiles, des aspirateurs... La liste des produits labélisés est disponible sur son site internet.

5.6.1.2 Critères de labélisation

Les critères du cahier des charges qui permettent d'obtenir les labels "allergènes contrôlés" et/ou « Air intérieur contrôlé », sont élaborés par des médecins experts de l'ARCAA avant d'être contrôlés et validés par le (la) Président(e) de l'ARCAA selon la procédure suivante :

- Un processus de travail analytique scientifique est élaboré en fonction des caractéristiques de chacun des produits, biens ou services afin de confirmer les qualités et l'intérêt que ceux-ci peuvent présenter pour les personnes allergiques.
- Un référentiel médical est constitué par différents critères préalablement approuvés par un organisme indépendant équipé de laboratoires qualifiés.
- La communication des résultats des tests obtenus par l'organisme indépendant seront validés, après leur lecture, par deux médecins experts de l'ARCAA en charge du dossier de labellisation, contresignés par le (la) Président(e) de l'ARCAA pour caution finale.

Les critères appliqués dépendent donc du type de produit et ne font pas l'objet d'un référentiel « standardisé ». Concernant les épurateurs d'air, d'après le site internet de l'ARCAA, seul un épurateur a été labélisé, en 2012. Le site ne mentionne pas si des demandes de label ont été formulées pour d'autres produits sans succès. Depuis janvier 2014 la labélisation des épurateurs d'air est suspendue.

5.6.2 ECARF (European Centre for allergy Research Foundation)

5.6.2.1 Missions de l'ECARF (ECARF 2016c)

La Fondation européenne de recherche sur les allergies (ECARF) a été créée en 2003 et a pour missions :

- L'amélioration de la qualité de vie des allergiques en Europe et au-delà ;
- L'évolution de la société grâce à des campagnes d'information sur les allergies ;
- L'évolution de la médecine grâce au soutien de la recherche sur les allergies.

La fondation est financée par le travail bénévole, les dons privés et d'institutions, le soutien public de projets et par des prestations de sa filiale « ECARF Institute GmbH ».

Dans le cadre de ces missions, l'ECARF mis en place un sigle de qualité qui distingue depuis 2006 les produits et services favorables aux allergiques. Ce sigle s'applique à différents biens de consommation : des épurateurs d'air intérieur, des produits cosmétiques, des produits détergents... ainsi qu'à des services : hôtels, restaurants...

Pour être labélisés, les produits et services doivent offrir aux personnes souffrant d'allergies des avantages particuliers et faciliter leur quotidien. Ces produits doivent être dans la même gamme de prix que des produits ou prestations comparables pour personnes non allergiques. Le sigle de la fondation ECARF a été développé en coopération étroite avec des experts de différents domaines spécialisés. Selon l'ECARF, il représente dans plus de dix langues une certaine « qualité » ainsi qu'une aide active aux décisions des consommateurs pour ce qui touche aux allergies.

Le processus de labélisation par l'ECARF est payant et le label obtenu est valable deux ans. A l'issue de ces deux années, le fabricant peut demander une extension de deux ans, si le produit n'a pas été modifié. Les essais sont réalisés par les fabricants.

5.6.2.2 Critères de labélisation d'un épurateur d'air (ECARF 2016a)

Pour qu'un épurateur d'air soit labélisé, il doit diminuer de manière significative les concentrations des allergènes suivants : pollens, bactéries et spores de moisissures, dans une pièce en conditions normales d'utilisation.

Dans des tests conduits avec des poussières de l'air intérieur :

- L'efficacité de rétention des poussières respirables ($\leq 7 \mu\text{m}$) doit être supérieure ou égale à 90 %.
- L'efficacité de rétention des bactéries doit être supérieure ou égale à 95 %.
- L'efficacité de rétention des spores de moisissures doit être supérieure ou égale à 85 %.
- La concentration d'allergènes dans l'air purifié doit être inférieure à 1 ng.m^{-3} .

Si le principe de fonctionnement de l'appareil est susceptible d'émettre de l'ozone, la concentration doit alors être inférieure à $15 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Enfin, le fonctionnement de l'appareil ne doit pas modifier la température ambiante et l'air purifié doit avoir une odeur neutre.

La liste des produits labélisés est disponible sur la version anglaise du site internet (ECARF 2016b) de l'institut. Trente-neuf épurateurs d'air autonomes sont labélisés, et pour chacun figurent les polluants ciblés ainsi qu'une description, fournie par le fabricant, plus ou moins détaillée de l'appareil. S'agissant d'une labélisation d'une fondation européenne, ces appareils peuvent ne pas être disponibles sur le marché français.

5.6.3 AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers)

5.6.3.1 Missions de l'AHAM (AHAM 2016)

L'Association des fabricants d'électroménagers (AHAM) est une association professionnelle qui a été fondée au Etats-Unis en 1915, initialement pour les fabricants de machines à laver. Elle s'est étendue depuis à tout l'électroménager et a ouvert une branche au Canada en 2012. La mission de cette association est d'être au service de l'industrie des appareils ménagers tout en promouvant les besoins des consommateurs par divers moyens. Parmi ses missions auprès des consommateurs, l'AHAM a élaboré des normes applicables à divers appareils ménagers, qui sont validées par l'Institut de normalisation des USA (*American national standards institute* (ANSI)) - a mis en place un programme de communication qui diffuse des fiches techniques sur la sécurité des produits et un programme d'homologation et de vérification des produits. Les fabricants peuvent faire certifier les propriétés techniques de leurs produits par un laboratoire indépendant, suivant les critères de l'AHAM. L'AHAM publie sur son site internet une liste des produits certifiés ainsi que les résultats des tests et permet au fabricant d'apposer un label sur leur produit.

Sur son site internet, l'AHAM met à disposition du public un moteur de recherche qui permet de rechercher un appareil suivant plusieurs critères : marque, débit d'air épuré sur différents polluants CADR (pollen, poussière, fumée de tabac), taille de la pièce recommandée...

5.6.3.2 Critères de labélisation d'un épurateur d'air (AHAM 2014)

Pour qu'un appareil soit certifié, les revendications d'efficacité du fabricant doivent être vérifiées par un laboratoire indépendant suivant la norme ANSI/AHAM AC-1-2006, « Method for Measuring the Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners » quel que soit son principe de fonctionnement. Cette norme définit comment mesurer le CADR « Clean Air Delivery Rate » pour le pollen, la poussière et la fumée. Le CADR est la capacité de l'appareil pour diminuer la concentration en polluant ; il se calcule en multipliant la différence entre le taux d'abattement d'un polluant avec l'appareil en fonctionnement et le taux d'abattement naturel du polluant par le volume de la chambre d'essais. Cette chambre d'essai doit être de 1800 ft³ (≈ 51 m³).

6 Evolution de la qualité de l'air intérieur associée à l'utilisation de dispositifs d'épuration d'air

Les chapitres précédents ont permis de dresser un panorama des dispositifs d'épuration de l'air intérieur présents sur le marché français ainsi qu'un recensement et un descriptif des technologies mises en œuvre au sein de ces dispositifs. Dans ce qui suit, les connaissances disponibles sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation de ces systèmes d'épuration d'air sont rassemblées et analysées. Les nouvelles technologies d'épuration sont particulièrement ciblées.

Dans cette optique, l'étude de la littérature scientifique a privilégié les études portant sur des appareils commercialisés utilisés en conditions réelles, ou du moins, proches de la réalité, depuis 2008 (et jusqu'en 2016).

Les études sont peu nombreuses et sont résumées dans les chapitres qui suivent en fonction des technologies utilisées par les appareils. Cependant, comme cela est montré dans l'étude de marché, les épurateurs autonomes combinent souvent plusieurs technologies. Un biais de la recherche bibliographique conduite est que les publications scientifiques décrivent souvent mal les appareils. De ce fait il n'est pas toujours possible de confirmer que l'efficacité de l'appareil est en lien avec la technologie mise en avant par l'article, ou bien par un filtre ou une autre technologie potentiellement présent dans l'appareil également.

Dans un premier temps sont traitées les techniques piégeant les polluants, et dans un second temps les techniques détruisant les polluants.

6.1 Techniques de piégeage

6.1.1 Ionisation simple / filtration électrostatique (ou électronique)

Pour rappel, ces procédés sont basés sur la génération d'ions, qui va entraîner le chargement des molécules et particules en suspension dans l'air. Dans le cas de l'ionisation simple, les particules de même charges vont se repousser et se déposer sur les surfaces (sol, murs, meubles...), alors que les particules de charges opposées vont s'attirer et former des particules plus lourdes qui vont se déposer sur les surfaces plus rapidement (Luengas *et al.* 2015). Ces particules peuvent donc être remises en suspension, alors que dans le cas de la filtration électrostatique, ou précipitation électrostatique, les particules ionisées sont collectées sur des plaques chargées, qui doivent être nettoyées régulièrement pour maintenir l'efficacité.

Les générateurs d'ions revendiquent une élimination des polluants de l'air intérieur et/ou une amélioration du bien-être et de la perception de la qualité de l'air intérieur (Siegel *et al.* 2008). L'étude de marché a montré que l'ionisation était la technique intégrée la plus rependue après la filtration, avec 40 % des dispositifs recensés pour l'ionisation simple et 7 % des dispositifs pour la précipitation électrostatique. Dans 75 % des cas, l'ionisation est associée à une ou deux autres technologies, principalement la filtration électronique.

D'après Siegel *et al.* (2008) qui ont réalisé une revue de la littérature et une synthèse de leurs travaux sur l'utilité des générateurs d'ions dans l'amélioration de la qualité de l'air intérieur, environ 8 % des foyers californiens seraient équipés de ionisateurs d'air. Ces systèmes d'épuration sont assez prisés, car ils sont peu bruyants et consomment moins d'électricité que les autres systèmes,

notamment ceux fonctionnant avec des filtres mécaniques de type particules aériennes à haute efficacité (*High Efficiency Particulate Air*(HEPA)).

L'analyse de la littérature de ces huit dernières années a permis d'identifier quelques études expérimentales sur la réaction des ions négatifs avec les polluants de l'air intérieur et l'émission de produits secondaires, dont une se rapprochant de conditions réelles, en termes de volume de la chambre d'essai.

6.1.1.1 Effets sur la perception de la qualité de l'air et la santé

a) Siegel et al. (2008)

Siegel et al. (2008) ont repris les résultats de 8 études conduites entre 1981 et 2001, impliquant des individus ayant des symptômes attribués au syndrome des bâtiments malsains (SBM). Les appareils utilisés dans ces études étaient destinés à un usage industriel, donc conçus pour traiter un volume d'air plus important que les appareils mobiles à usage domestique. Dans ces études, les symptômes ont été évalués en présence d'un épurateur d'air et comparés aux symptômes perçus avec un épurateur d'air « placebo », et/ou aux symptômes perçus dans un environnement similaire sans générateur d'ions. Les résultats de ces études sont mitigés : quatre études montrent une amélioration statistiquement significative des symptômes, et quatre études montrent une amélioration non significative. Considérant les résultats de ces études, il n'est pas possible de conclure sur l'efficacité des générateurs d'ions pour lutter contre les symptômes attribués au SBM (Tableau 3).

Tableau 3 : Impact des générateurs d'ions sur la perception de la qualité de l'air (Siegel et al. 2008)

Référence	Nombre de sujets	Perceptions/symptômes évalués dans l'étude	Impact du générateur d'ions sur la fréquence et la sévérité des symptômes ¹	Utilisation d'un placebo et/ou population de référence ²
Fishman (1981)	8	ouvert/oppressant, agréable/désagréable, sec/humide, frais/renfermé, confortable/inconfortable, apaisant/irritant, vivifiant/somnolent, calmant/excitant, plaisant/ennuyant, bon/mauvais, peau sèche/peau humide, yeux secs/yeux humides, nez dégagé/nez congestionné	Sans effet	Placebo
Hawkins (1981)	108	mesure du confort thermal, alerte somnolence, échelle de fraîcheur-renfermement, incidence reportée de maux de tête	Amélioration significative	Population de référence et placebo
Laws (1982)	74	Incidence de maux de tête, nausée, vertige	Amélioration	Placebo

Référence	Nombre de sujets	Perceptions/symptômes évalués dans l'étude	Impact du générateur d'ions sur la fréquence et la sévérité des symptômes ¹	Utilisation d'un placebo et/ou population de référence ²
		vigilance perçue, fraîcheur, sensation de confort et de plaisir	Amélioration significative	
Hawkins et Morris (1984)	79	plaintes de léthargie	Amélioration significative	Population de référence et placebo
Wyon (1992)	28	gorge sèche, lèvres sèches, peau sèche, ongle cassants, yeux secs	Amélioration significative	Population de référence et placebo
Shaughnessy <i>et al.</i> (1994)	10	irritation nasale moyenne, irritation oculaire moyenne, acceptabilité globale de l'air	Amélioration	Population de référence
Rosén et Richardson (1999)	93	absentéisme pour maladie	Amélioration	Population de référence
Richardson <i>et al.</i> (2001)	7	poussières et saletés, courant d'air, air renfermé, air sec	Amélioration	Population de référence

¹ « Amélioration significative » renvoie à une significativité statistique définie par chaque auteur. « Amélioration » et « sans effet » signifient qu'il n'y a pas de significativité statistique.

² « Placebo » indique que les symptômes ont également été évalués en présence d'un épurateur factice qui semblait fonctionner et « Population de référence » signifie que les symptômes ont été comparés à une population de référence dans un environnement identique ou similaire en l'absence de générateur d'ions.

b) Skulberg *et al.* (2005)

Skulberg *et al.* (2005) ont conduit une étude d'intervention en double aveugle afin d'évaluer si la diminution de la concentration en particules, lors de l'utilisation d'un épurateur commercialisé, muni d'un filtre électrostatique et d'un filtre à charbon actif (dont l'objectif est d'éliminer l'ozone produit par l'épurateur), permettait de diminuer les irritations des muqueuses des voies aériennes supérieures et inférieures chez des travailleurs. Quatre-vingts travailleurs ont été recrutés dans six entreprises dans la région d'Oslo. Les critères d'inclusion étaient les suivants :

- Travailler dans un bureau seul, dans lequel la concentration en particules est supérieure à $40 \mu\text{g.m}^{-3}$, dans un bâtiment de bureaux sans autre activité,
- Etre non-fumeur et déclarer des symptômes des voies aériennes inférieures et supérieures. Le questionnaire de screening comportait des questions sur les irritations nasales, oculaires, de la gorge, la toux et les allergies.

Deux groupes homogènes au regard du sexe, de l'âge, des symptômes reportés et de l'allergie ont été constitués, l'un de contrôle et l'autre d'intervention. Le filtre électrostatique a été inactivé dans les épurateurs utilisés par le groupe contrôle. L'étude s'est déroulée sur deux périodes successives de trois semaines chacune.

Les concentrations en particules ont été mesurées en amont de l'étude afin de sélectionner les participants, puis avant et en fin d'intervention.

Trois indices de symptômes ont été construits sur les bases de questionnaires portant sur les trois semaines d'intervention :

- Symptômes cutanés (échelle de 0 à 8) : sécheresse, rougeurs, démangeaison et sensation de brûlure au visage.
- Symptômes des membranes muqueuses (échelle de 0 à 8) : irritation nasale, de la gorge, des yeux, ou toux.
- Symptômes généraux (échelle de 0 à 10) : fatigue, sensation de tête lourde (« heavy-headed »), céphalées, nausées ou troubles de la concentration.

Des mesures physiologiques ont été également réalisées :

- Congestion nasale par rhinométrie acoustique,
- Débit expiratoire de pointe (DEP).

La diminution moyenne de la concentration en particules était de $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ dans le groupe « intervention » et de $8 \mu\text{g.m}^{-3}$ dans le groupe « contrôle », soit respectivement un abattement de 46 et 18 %. Les concentrations de toutes les fractions de particules ont été réduites, mais l'abattement des particules de diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$ était plus important. Les auteurs suggèrent que la diminution de la concentration pour le groupe « contrôle » est due, d'une part à l'action du filtre à charbon actif qui peut retenir les plus grosses particules et d'autres par au brassage de l'air par l'épurateur qui favoriserait l'élimination des particules par le système de ventilation central.

Les indices des symptômes d'irritation ont été réduits de 4 à 3 points après l'intervention dans le groupe « intervention ». Les deux groupes ont montré une réduction de l'indice des symptômes généraux, mais plus significativement dans le groupe « intervention ».

Trois des quatre indicateurs de congestion nasale ont diminué dans le groupe « intervention », mais faiblement.

Le DEP a légèrement augmenté dans le groupe « intervention » de manière statistiquement significative.

En conclusion, les auteurs notent que l'épurateur à filtration électrostatique a permis de réduire la concentration en particules, mais n'a pas eu d'impact significatif sur la santé des participants.

Le même auteur a conduit une autre étude similaire rapportée dans les actes de conférence en 2011 (Skulberg, Hellum, et Sjøvold 2011). L'auteur conclut que les résultats sont en accord avec ceux de la précédente étude.

6.1.1.2 Effets sur les polluants chimiques et les particules

a) Siegel et al. (2008)

Dans leur revue, Siegel *et al.* (2008) ont relevé 11 études conduites entre 1983 et 2007 permettant d'apprécier l'efficacité de ces épurateurs pour éliminer les particules. Dans ces 11 études, les débits d'air épuré relevés sont assez faibles, de moins de $10 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, jusqu'à $500 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ (pour un dispositif à usage commercial). L'auteur conclut que la plupart de ces appareils ont des débits d'air épuré insuffisants pour être efficaces dans un environnement intérieur standard. A titre de comparaison, les épurateurs utilisant des filtres HEPA (filtration mécanique) ont généralement des CADR de l'ordre de 250 à $630 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

L'émission d'ozone que peuvent générer certains de ces appareils peut s'avérer problématique. En effet, l'ozone en plus d'être un irritant respiratoire, peut également interagir avec d'autres polluants

pour former des particules fines et ultrafines ainsi que des sous-produits gazeux. Siegel *et al.* (2008) ont repris les taux d'émission d'ozone relevés pour 26 dispositifs dans 7 études conduites entre 1999 et 2007. Les appareils testés étaient de natures différentes : appareils portables pour une pièce entière, de petites unités pour les voitures, pour les petites pièces comme les salles de bains, ainsi que des appareils individuels, à porter autour du cou. Les taux d'émission d'ozone allaient de $56 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ à $4,3 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$. Les auteurs précisent que ces appareils sont cependant conformes à la norme d'émission d'ozone ANSI/UL 867 section 37, de 0,05 ppm. Cependant, les conditions d'essais de cette norme peuvent varier et ne sont pas représentatives de l'émission en conditions réelles.

Outre la synthèse de la littérature, l'étude de Siegel *et al.* (2008) avait également pour objectif de déterminer l'évolution de la concentration en particules fines et ultrafines liée à la formation d'aérosols organiques secondaires. Ces derniers sont formés par la réaction entre l'ozone, qui peut être généré par un épurateur, et les composés insaturés présents dans l'air intérieur, suite à l'utilisation de désodorisants notamment. Aux Etats-Unis, deux épurateurs populaires ont été testés dans une chambre d'essais de $14,75 \text{ m}^3$. Deux exemplaires (épurateurs A1 et A2) ont été testés pour le premier modèle, et le second modèle (épurateur B) a été testé avec et sans lampe UV, dont l'objectif était de neutraliser les bioaérosols. Les tests ont été réalisés sur une durée de 24 heures. Les taux de renouvellement de l'air différaient pour les deux épurateurs : environ $0,5 \text{ h}^{-1}$ pour le modèle A et $0,95 \text{ h}^{-1}$ pour le modèle B.

Le bruit de fond de la concentration en ozone était d'environ 8-27 ppb, pour atteindre, lors du fonctionnement des épurateurs, un état stationnaire à 120 ppb pour le modèle A et 45 ppb pour le modèle B. Le fonctionnement de l'appareil entraîne donc une forte augmentation de la concentration en ozone. Lorsque les épurateurs fonctionnent en présence du désodorisant, la concentration en ozone diminue jusqu'à 9-21 ppb, pour les deux modèles. Cette diminution est liée à la réaction entre l'ozone et le produit désodorisant.

Le bruit de fond de la concentration en particules ultrafines était inférieur à $15 \text{ particules}/\text{cm}^3$. En l'absence du désodorisant, l'épurateur a permis de diminuer les concentrations en particules, particulièrement celles d'un diamètre supérieur à 20 nm. L'introduction du désodorisant a entraîné une très forte augmentation de la concentration en particules quelle que soit la taille, jusqu'à plus de $100\,000 \text{ particules}/\text{cm}^3$ pour les particules de diamètre compris entre 20 et 50 nm. L'état stationnaire en présence du désodorisant est significativement plus élevé ($p > 0,05$) pour :

- les particules de diamètre compris entre 11 et 50 nm pour les essais sur l'appareil A,
- toutes les particules pour l'essai sur l'appareil B,
- les particules de diamètre supérieur à 21 nm pour l'essai sur l'appareil B avec la lampe UV.

Dans cet essai, l'efficacité des épurateurs pour éliminer les particules, en présence de terpènes, diffère en fonction des modèles et des tailles de particules, mais pour la plupart des particules, la concentration lors du fonctionnement de l'appareil en présence du désodorisant était supérieure à celle du bruit de fond.

Ainsi, les auteurs concluent qu'en présence de terpènes, le fonctionnement de ces épurateurs génère plus de particules qu'il n'en élimine. Ils soulignent que lorsque les débits d'air épuré pour les particules sont mesurés en laboratoire, directement en sortie d'appareil, en l'absence d'autres polluants comme l'ozone ou les terpènes, le résultat en termes d'abattement de concentration en particules peut être surestimé car la formation de particules secondaires n'est pas prise en compte. De même, la norme UL 867 qui permet aux Etats-Unis de mesurer le taux d'émission d'ozone, ne prévoit pas de mesurer la concentration en terpènes ou autre substances pouvant réagir avec l'ozone. De ce fait, l'émission d'ozone peut être quant à elle sous-estimée.

b) *Waring, Siegel, et Corsi (2008)*

Waring, Siegel, et Corsi (2008) ont conduit une étude sur l'élimination et la génération de polluants lors de l'utilisation de cinq épurateurs d'air : deux épurateurs HEPA (filtration mécanique), un épurateur à filtre électrostatique et deux générateurs d'ions (non munis de ventilateur). L'étude s'est déroulée en deux phases. La première avait pour objectif de caractériser l'efficacité des épurateurs pour éliminer les particules (calcul du débit d'air épuré et mesure à la sortie de l'appareil) et de mesurer les émissions d'ozone. Lors de la seconde phase, cinq ioniseurs ont été utilisés en présence d'une source de terpènes pour déterminer l'impact de la formation d'aérosols organiques secondaires sur la concentration en particules. Les tests ont été conduits dans une chambre d'essai en acier inoxydable de 14,75 m³.

Pour mesurer le débit d'air épuré sur les particules, la chambre d'essai a été préparée afin de limiter autant que possible la présence de particules, d'ozone et de COV, puis trois bâtons d'encens ont été brûlés pendant 15 minutes et le taux de décroissance naturel des particules a été mesuré. Puis trois bâtons d'encens ont de nouveau été allumés pendant 15 minutes avant la mise en marche de l'épurateur à son débit maximal.

Les résultats figurent dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Débits d'air, débits d'air épuré de la première phase de l'étude de Waring, Siegel, et Corsi (2008)

Epurateurs	Débit d'air (m ³ .h ⁻¹)	Résumé des débits d'air épuré (m ³ .h ⁻¹)			
		Min	Max	Moyenne (déviat ion standard)	Médiane
Filtre électrostatique	850 ± 26	112	455	284 (62)	283
HEPA 1	309 ± 9,3	92	259	188 (30)	188
HEPA 2	571 ± 17	203	481	324 (44)	340
Générateur d'ions 1	51 ± 1,5	16	76	41 (11)	39
Générateur d'ions 2	<30	17	74	35 (13)	31

L'épurateur « HEPA 2 » et le « filtre électrostatique (ESP) » ont les débits d'air épuré les plus élevés. Les générateurs d'ions ont des débits d'air épurés très faibles, en lien avec leurs faibles débits d'air.

L'efficacité en sortie d'appareil a également été mesurée. Les épurateurs HEPA et le filtre électrostatique ont une efficacité inférieure à 60 % pour les particules de moins de 200 nm de diamètre ; elle augmente légèrement pour les particules de plus grande taille. A noter, que l'efficacité mesurée est bien celle de l'épurateur et pas du filtre. Dans le cadre du filtre HEPA, l'efficacité du filtre est au minimum de 99,97 %, la différence entre l'efficacité du filtre et de l'épurateur vient probablement de la conception de l'appareil avec des dériviati
ons de l'air autours du filtre.

Une modélisation de l'efficacité de ces cinq épurateurs dans une pièce de 50 m³ et dans une maison de 392 m³ avec un taux de renouvellement de l'air de 0,5 h⁻¹ a été réalisée. Dans la pièce de 50 m³, les épurateurs HEPA et le filtre électrostatique éliminent environ 80-90 % des particules d'un diamètre supérieur à 50 nm alors que les générateurs d'ions n'en éliminent que 40-60 %. Dans la maison de 392 m³, l'élimination est de 40-60 % pour les épurateurs HEPA et filtre électrostatique et de 10-20 % pour les générateurs d'ions.

Les émissions d'ozone des générateurs d'ions et de l'ESP ont été mesurées, et l'impact du fonctionnement de ces appareils sur la concentration en ozone dans une pièce de 50 m³ et une maison de 392 m³ a été modélisé (Tableau 5).

Tableau 5 : Emissions d'O₃, concentrations prévisionnelles (C*) dans des volumes de 50 et 392 m³ (Waring, Siegel, et Corsi 2008)

Epurateur	Emission d'O ₃ (mg.h ⁻¹)	V = 50 m ³ C* (ppb)	V = 392 m ³ C* (ppb)
Filtre électrostatique	3,8 ± 0,2	8,6	1,1
Générateur d'ions 1	3,3 ± 0,2	7,5	1,0
Générateur d'ions 2	4,3 ± 0,2	9,7	1,2

Le générateur d'ions 2 a le taux d'émission d'ozone le plus élevé, alors qu'il a le débit d'air épuré le plus faible. L'épurateur électrostatique présente un taux d'émission un peu plus faible, pour un débit d'air épuré bien plus élevé, son filtre à charbon actif élimine vraisemblablement une partie de l'O₃ généré. Cette génération d'ozone n'est pas anodine : les auteurs soulignent qu'une augmentation de 10 % de la concentration d'O₃ dans l'air extérieur entraîne une augmentation de la mortalité de 0,52 %. De plus, comme déjà évoqué plus haut, l'ozone peut réagir avec d'autres substances et entraîner la formation de sous-produits plus nocifs. Pour la deuxième phase de l'étude, cinq générateurs d'ions ont été testés en présence d'une source de terpènes : 3 modèles d'une même marque (nommés IG, 1, 3 et 4) et 2 exemplaires d'un épurateur d'une autre marque (IG 5A et 5B). Pour le modèle IG4, une lampe UV a été ajoutée dans l'objectif d'éliminer les bioaérosols. Les 5 épurateurs testés étaient neufs.

Chaque test a duré environ une journée pendant laquelle les concentrations en ozone et particules ont été mesurées en continu. Les tests se sont déroulés en trois phases d'au moins 4 heures :

1. mesure du bruit de fond (épurateur éteint),
2. fonctionnement de l'épurateur,
3. fonctionnement de l'épurateur en présence d'un désodorisant (source de terpènes).

Lors du fonctionnement de l'épurateur, les résultats montrent une augmentation de la concentration en ozone et une diminution de la concentration en particules. En présence du désodorisant, la concentration en ozone diminue et celle en particules augmente, de manière statistiquement significative pour les particules de 4,6 à 157 nm de diamètre, en fonction des épurateurs.

Les auteurs soulignent que ces résultats démontrent que les ionisateurs peuvent entraîner la formation de particules ultrafines, mais que ces résultats ont toutefois des limites. D'une part, dans

des conditions réelles, les concentrations en ozone et terpènes seraient plus diluées, ce qui limiterait la formation des particules ultrafines, et d'autre part, l'ozone produit par l'épurateur réagirait également avec les surfaces, dont les moquettes/tapis. Ils indiquent néanmoins que l'utilisation de ces épurateurs en environnement intérieur peuvent être une source de danger et que les épurateurs HEPA testés dans cette étude sont plus efficaces pour éliminer les particules et ne génèrent pas d'ozone ou d'autres sous-produits.

c) Waring et Siegel (2011)

Dans une autre étude, Waring et Siegel (2011) ont évalué l'impact d'un ionisateur d'air dans une pièce résidentielle réelle de 27 m³, dans un duplex de 475 m³. Cette dernière était meublée et munie d'une ventilation centralisée, qui était éteinte la nuit. Un ventilateur au plafond brassait l'air pendant toute la durée de l'essai. Les essais ont duré 2 jours pour chacune des configurations suivantes, avec et sans ionisateur :

- pièce meublée (RC 1)
- pièce meublée + tapis et rembourrage achetés un mois avant les essais (RC 2)
- pièce meublée + désodorisant branché (RC 3)
- pièce meublée + tapis et rembourrage d'un mois + désodorisant branché (RC 4)

Les concentrations en ozone, particules, aldéhydes et terpènes ont été mesurées. Le terpène principalement émis par le désodorisant est le d-limonène.

Les résultats, sans ventilation centralisée, montrent qu'en l'absence de désodorisant, la concentration en particules ultrafines diminue avec l'utilisation de l'ionisateur, alors qu'elle augmente en présence du désodorisant. En présence du désodorisant avec l'ionisateur en fonctionnement (RC 3), la concentration de d-limonène diminue de 14 ppb. En présence du tapis avec rembourrage (RC 4), la diminution observée est de 8 ppb. Ce résultat qui indique que l'augmentation de la concentration en particules est probablement due à la formation d'aérosols organiques secondaires par la réaction en l'ozone et le limonène. D'après les spécifications techniques, l'ionisateur émet 3,3 ($\pm 0,2$) mg.h⁻¹, son utilisation augmente la concentration en ozone quelle que soit la configuration. L'augmentation de la concentration en ozone est la plus forte pour la pièce meublée (RC 1), et diminue pour les configurations 2 et 3, pour être quasiment nulle en présence du tapis et du désodorisant (RC4). D'après les auteurs, ce résultat serait lié à la réactivité de l'ozone avec les surfaces et les COV, l'ajout du tapis augmente la surface, et l'ajout du désodorisant celle des COV. La configuration 4 entraîne une pièce très réactive où l'ozone émis par l'épurateur réagit quasiment totalement.

Concernant les aldéhydes (C1-C4 et C6-C10), seules les concentrations en formaldéhyde et nonanal ont augmenté avec le fonctionnement de l'épurateur, les autres aldéhydes n'ont pas été affectés. Ces aldéhydes ont été formés par la réaction de l'ozone avec les matériaux de la pièce et le désodorisant.

Les auteurs concluent que cette étude confirme l'impact négatif potentiel d'un ionisateur d'air sur la qualité de l'air intérieur, ce qui avait été observé dans des chambres d'essais. Ils soulignent par ailleurs que ces essais se sont déroulés dans une pièce inoccupée, alors que les ionisateurs sont généralement destinés à être utilisés dans des pièces occupées. Or l'ozone peut également réagir avec la peau et les cheveux pour former notamment de l'acétone. Par précaution, les auteurs indiquent que l'usage de tels épurateurs devrait être limité en l'absence de certitude sur leurs innocuités.

d) Wu et Lee (2004)

Les travaux de Wu et Lee (2004) ont porté sur l'oxydation des COV par les ions négatifs de l'air. Ils ont étudié la réaction de trois composés organiques volatils, le chloroforme, le toluène et le 1,5-hexadiène avec les ions négatifs dans un réacteur expérimental dans une chambre d'essais conçue pour prévenir la formation d'ozone et de NO_x. Les essais conduits, avant l'introduction des COV, ont montré qu'en deçà d'une décharge de 16 kV, il n'y avait pas de génération d'ozone ou de COV. De 17 à 30 kV, les concentrations en ozone et NO_x augmentent avec la décharge pour atteindre, respectivement, 504 et 150 ppb, à 30kV. Les essais ont donc été conduits à 15 kV pour limiter la production de sous-produits. La quantité d'ions négatifs produits augmente de manière exponentielle avec le voltage de la décharge.

Les résultats de ces recherches ont montré que la réaction entre ces composés et les ions négatifs est une réaction d'oxydation lente (de l'ordre de plusieurs heures) qui peut être influencée par le taux d'humidité relative, en particulier pour le chloroforme et le toluène. Ces travaux ont également mis en évidence que les produits finaux des réactions d'oxydation de ces COV étaient l'eau et le dioxyde de carbone mais que des produits secondaires étaient également émis. La réaction d'oxydation du chloroforme par les ions négatifs s'est accompagnée d'une production d'acide chlorhydrique et l'oxydation du 1,5-hexadiène a provoqué la formation de 4-pentanal. En outre, bien que cette étude ait permis de démontrer une réelle capacité des ions négatifs à oxyder les COV considérés, il convient de noter que les concentrations d'ions générés lors de ces essais ont été bien supérieures aux niveaux de concentration d'ions générés par les appareils commercialisés.

e) Ardkapan et al. (2011)

Ardkapan *et al.* (2011) ont testé trois épurateurs portables, fonctionnant sur le principe de l'ionisation (décharge corona), du plasma et du traitement photochimique (UV), dans une chambre d'essai d'acier et de verre de 30 m³ et dans un conduit. Cette chambre d'essai était conçue pour avoir une faible concentration en particules ultrafines. Les tests ont été faits en automne et en été. Les concentrations en particules ultrafines et en ozone sont relevées en continu pendant l'essai.

Pour le test de l'épurateur fonctionnant sur le principe de l'ionisation, (300 m³.h⁻¹), l'essai a duré 6h, dont 1 heure de mesures avant la mise en marche de l'appareil.

La concentration en ozone augmente dès la mise en marche de l'appareil, pour atteindre un état stationnaire à 35 ppb après environ une heure de fonctionnement, quelle que soit la saison.

La concentration en particules ultrafines n'augmente pas significativement et fluctue pendant toute la durée de l'essai, y compris avant la mise en marche de l'appareil. La concentration maximale mesurée est d'environ 1000 PM.cm⁻³, quelle que soit la saison.

Ces essais ont également été menés dans un conduit, c'est à dire avec un passage unique de l'air dans l'appareil, et les résultats montrent que l'augmentation de la concentration en ozone était moindre. Les auteurs concluent que les tests menés avec un passage unique de l'air dans l'épurateur ne sont pas adaptés à l'évaluation de la production d'ozone lors du fonctionnement de l'appareil dans une pièce.

Concernant l'augmentation de la concentration en particules ultrafines, les auteurs émettent l'hypothèse de la formation de particules lors de la réaction de l'ozone avec des composés organiques volatils, certaines études ayant montré que le limonène et l' α -pinène pouvaient réagir avec l'ozone pour former des particules ultrafines.

f) Ardkapan, Afshari, et Bergsøe (2015)

Dans une autre étude d'Ardkapan, Afshari, et Bergsøe (2015) l'efficacité de cinq épurateurs d'air autonomes, dont un générateur d'ions, a été testée dans un bureau. Le bureau vide de 47,5 m³ avait une fenêtre et se situait dans un bâtiment vide. Les murs étaient peints et n'avaient pas été rénovés depuis 20 ans. L'étude s'est déroulée en deux phases, pendant lesquelles les concentrations intérieure et extérieure en particules ultrafines et en ozone ont été mesurées pendant toute l'expérience. Lors de la première phase, l'épurateur en fonctionnement était placé au centre de la pièce, sans génération de particules. Dans la seconde phase les particules étaient générées par la combustion d'une bougie en cire. Cette dernière a été allumée jusqu'à l'atteinte d'une concentration stationnaire de particules ultrafines, puis éteinte. Le taux de décroissance naturel des particules ultrafines a alors été calculé, puis la bougie rallumée pour atteindre de nouveau la concentration stationnaire avant la mise en marche l'épurateur. L'épurateur est éteint lorsque la concentration a de nouveau atteint la concentration de fond. Deux ventilateurs fonctionnent également dans la pièce afin de brasser l'air. Lors de l'utilisation de l'ionisateur, la concentration en ozone a augmenté de 10-15 ppb à 26 ppb et celle des particules ultrafines a diminué. L'auteur souligne que contrairement à d'autres études, l'augmentation de la concentration en ozone n'a pas entraîné d'augmentation de la concentration en particules. La concentration en COVt était d'environ 1,75 ppm ; l'auteur fait l'hypothèse que la concentration en COV insaturés n'était pas suffisante pour que ces molécules réagissent avec l'ozone et forment des particules secondaires.

6.1.1.3 Effets sur les polluants biologiquesa) Fletcher et Van Der Graaf (2011)

Les travaux conduits par Fletcher et Van Der Graaf (2011) sont les seuls identifiés et retenus, qui concernent des épurateurs commerciaux, testés dans des conditions proches de la réalité en terme de volume de chambre d'essais (31 m³). L'objectif de ces travaux était d'évaluer l'efficacité de sept épurateurs d'air autonomes, dont six disposaient d'une fonction d'épuration d'air sur des microorganismes (*Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus*) présents dans l'air. Tous les épurateurs étaient munis de filtres HEPA et à charbon actif. Parmi les six épurateurs équipés d'une fonction ionisation, seulement trois augmentent la concentration en ions positifs et négatifs, dont deux de manière significative. Trois des épurateurs ne génèrent donc pas, ou pas suffisamment d'ions pour modifier la concentration en ions dans la chambre d'essais. Un test complémentaire conduit sur ces trois appareils, directement en sortie d'air de l'appareil, a montré que deux des trois appareils (A et C) ont une capacité limitée de générations d'ions, alors que le dernier (G) ne génère rien. Les revendications d'ionisation de l'air de ces épurateurs sont donc injustifiées.

Tableau 6 : Résumé des résultats de l'étude de Fletcher et Van Der Graaf (2011)

Epurateur	Augmentation de la concentration (concentration allumé - ions.cm ⁻³) dans la chambre		Concentration - ions.cm ⁻³ à la sortie de l'épurateur		Réduction de la concentration de <i>Staphylococcus aureus</i> (%)		Réduction de la concentration de <i>Bacillus subtilis</i> (%)	
	négatifs	positifs	négatifs	Positifs	éteint	allumé	éteint	allumé
A	-	-	270	310	-	76,8	-	18,2

Epurateur	Augmentation de la concentration (concentration allumé - ions.cm ⁻³) dans la chambre		Concentration - ions.cm ⁻³ à la sortie de l'épurateur		Réduction de la concentration de <i>Staphylococcus aureus</i> (%)		Réduction de la concentration de <i>Bacillus subtilis</i> (%)	
	négatifs	positifs	négatifs	Positifs	éteint	allumé	éteint	allumé
	(1089)	(1397)						
B	x 8 (10624)	x 6 (10476)	> 10 ⁶	4000	62,6	69,8	53,5	81,2
C	- (1157)	- (1318)	1050	1480	53,2	66,9	33,9	43,1
D (pas de fonction ionisation)	- (1125)	- (1916)	-	-	74,8	-	36,2	-
E	x 3 (3775)	x 3 (2802)	62000	1000	55,8	32,5	48,3	31,5
F	x 27 (36094)	x 24 (18747)	> 10 ⁶	948000	47,7	42,1	52,7	32,9
G	- (1301)	- (1974)	200	110	46,2	55,3	21,1	56,8
Bruit de fond			200	90				

■ pas de différence statistique significative entre les données contrôles et tests

Concernant l'efficacité sur l'abattement des bactéries *S. aureus*, les résultats sont assez hétérogènes. Les quatre épurateurs les plus efficaces, avec une diminution supérieure à 66%, sont les épurateurs A, B, C et D. les appareils A et C ne montraient qu'une capacité limitée à produire des ions, l'appareil D lui, ne disposant pas de fonction ionisation. L'épurateur B, dont la fonction ionisation est performante, ne montre qu'une amélioration de la performance de 7 % lorsque que celle-ci est activée. Les épurateurs E et F, ont une efficacité limitée, considérant les quantités d'ions qu'ils produisent, cette efficacité est même plus importante lorsque la fonction ionisation est éteinte. Enfin, l'appareil G, qui se montrait inefficace pour générer des ions, montre une efficacité moyenne qui augmente légèrement lors de l'activation de la fonction ionisation.

Concernant l'efficacité sur l'abattement des bactéries *B. subtilis*, celle-ci est inférieure à celle de *S. aureus* sauf pour l'épurateur B, pour lequel elle est supérieure, et pour l'épurateur G pour lequel elle est du même ordre de grandeur. Pour l'épurateur B, l'efficacité est jugée bonne par les auteurs ; elle est moyenne pour l'épurateur G, et les autres épurateurs sont peu efficaces. A l'exception de l'épurateur B, la mise en marche de la fonction ionisateur diminue la performance ou ne l'améliore pas de manière significative.

In fine, concernant l'implication de la fonction ionisation sur l'abattement des bactéries dans l'air, seul un appareil, B, montre une augmentation significative de la performance sur *B. subtilis*, de 53 à 81 %. Il n'a pas été observé de relation entre l'élimination des bactéries et les concentrations d'ions. L'appareil qui émet le plus d'ions, n'a pas d'effet significatif sur la concentration des bactéries. D'après les auteurs, il semblerait que le filtre HEPA soit le plus grand contributeur à l'efficacité des appareils sur l'élimination des bactéries.

Les auteurs soulignent que si les appareils testés revendiquaient tous une efficacité supérieure à 99% pour l'élimination des bactéries et/ou virus présents dans l'air, dans la pratique, cette performance n'est pas atteinte, voire en est loin. Il est à noter que la méthode de test utilisée par le fabricant pour revendiquer cette efficacité n'est pas mentionnée. Les auteurs soulignent que les tests à passage unique ou de dégradation ne sont pas adaptés pour des appareils conçus pour être utilisés dans une pièce habitée. Les tests en conditions stabilisées sont plus appropriés.

b) Cai et al. (2008)

La publication de Cai *et al.* (2008) présente une étude de l'exposition continue de *Caenorhabditis elegans* à des ions négatifs dans une chambre d'essais. Les ions négatifs étaient produits par des décharges corona générées par un ionisateur conçu pour des conditions expérimentales. Il a été mis en évidence que l'exposition continue de *Caenorhabditis elegans* à des ions négatifs entraînait une diminution de leur période de développement et de leur espérance de vie. Ces effets biologiques significatifs sont vraisemblablement attribuables aux espèces réactives produites par l'ionisation de l'air, principalement l'ozone et les radicaux libres, l'anion superoxyde $O_2 \cdot$ et le radical hydroxyle $\cdot OH$.

6.1.1.4 Conclusions

Si 40 % des dispositifs d'épuration présents sur le marché français intègrent une fonction d'ionisation, leur capacité à améliorer la qualité de l'air intérieur n'apparaît pas toutefois démontrée dans des conditions réelles, au vu de l'analyse bibliographique. De plus, les ionisateurs d'air revendiquent généralement induire une sensation de bien-être qui n'est souvent pas démontrée. A l'occasion de la conférence Indoor Air de 2016, Scheepers *et al.* (2016) ont présenté une revue de la littérature sur la toxicité des ions et l'impact d'une charge électrique sur la toxicité des particules. Les auteurs concluent qu'à ce jour, il n'y a pas de preuve robuste d'un effet bénéfique ou néfaste de l'inhalation d'ions. Cependant si les particules chargées sont inhalées et deviennent biodisponibles, des effets néfastes peuvent apparaître. Cette situation peut se présenter dans le cas de nanoparticules chargées positivement.

L'analyse de la littérature des huit dernières années met en évidence une efficacité mitigée dans les situations de recours à ces dispositifs comme moyen de lutte contre le syndrome des bâtiments malsains (Siegel *et al.* 2008).

Concernant l'efficacité sur les particules : l'ASHRAE souligne que l'efficacité varie considérablement selon les appareils et leurs conditions de fonctionnement ; cependant, les études montrent qu'il n'y a pas ou peu de bénéfices sur les symptômes aigus (ASHRAE 2015). Les débits d'air épuré sont souvent insuffisants pour traiter une pièce. Par ailleurs, le fonctionnement de ces appareils en présence de composés organiques insaturés, comme les terpènes, peut également entraîner une augmentation de la concentration en particules ultrafines en raison de la génération d'ozone par le dispositif (Arđkapan *et al.* 2011, Siegel *et al.* 2008).

L'US-EPA indique que les ionisateurs d'air munis de précipitateurs électrostatiques, ou filtres électrostatiques, peuvent être efficaces sur les particules fines (jusqu'à 98 % pour certains appareils (en sortie d'appareil) à de faibles débits). L'efficacité est plus élevée aux faibles débits et lorsque les plaques collectant les particules sont propres (US-EPA 2009).

Concernant les effets sur les COV : l'étude de Wu et Lee (2004) montre une réelle efficacité pour l'oxydation des COV. Toutefois, la capacité du dispositif expérimental à générer des ions était bien supérieure à celle des appareils commercialisés. Par ailleurs, cette action sur les COV peut entraîner la formation de produits secondaires si l'oxydation est incomplète ; par exemple, en

présence de chloroforme ou de 1,5-hexadiène, le fonctionnement de l'appareil a entraîné la formation d'acide chlorhydrique et de pentanal.

Concernant l'efficacité sur les contaminants biologiques : les résultats sont mitigés en fonction des souches sur lesquels les tests ont porté. Ainsi si l'étude de Fletcher *et al.* (2011) montre une potentielle efficacité sur deux souches de bactéries de certains épurateurs équipés d'une fonction ionisation, cette dernière ne semble pas en être à l'origine. L'efficacité est *a priori* davantage attribuée aux filtres HEPA qui équipent également les appareils étudiés. Toutefois, une étude de Cai *et al.* (2008) a établi un lien entre l'exposition à des ions négatifs et la diminution de la période de développement et l'espérance de vie de *Caenorhabditis elegans*. Les ionisateurs ont donc un effet potentiel sur des espèces vivantes, mais qui reste à démontrer avec des dispositifs commercialisés.

Concernant la génération de sous-produits : certains générateurs d'ions négatifs, de par leur conception, peuvent émettre de l'ozone. Les générateurs à électrode de décharge électrique sont les plus concernés par ce risque de production d'ozone. L'ionisation du milieu entraîne un phénomène de décharge électrique partiel, appelé effet corona. Lorsque ce phénomène n'est pas suffisamment maîtrisé, cette décharge électrique provoque la transformation du dioxygène de l'air en ozone (US-EPA 2009, Siegel *et al.* 2008). Si les concentrations produites sont en dessous des concentrations qui pourraient affecter la santé humaine (US-EPA 2009), la capacité de l'ozone à réagir avec plusieurs polluants de l'air intérieur conduit à la formation de nombreux sous-produits. Ainsi, l'ozone réagit notamment avec des composés issus des produits ménagers, de désodorisants, des revêtements de sols comme le parquet, des peintures murales... pour former des particules ultrafines, du formaldéhyde, des cétones et des acides organiques (US-EPA 2009, Siegel *et al.* 2008).

La réaction d'ionisation peut également s'accompagner de la formation de sous-produits et d'espèces réactives de l'oxygène (*Reactive Oxygen Species* (ROS)). Ces espèces réactives comprennent des molécules entières (les hydroperoxydes ROOH, le peroxyde d'hydrogène H₂O₂, l'acide hypochloreux HOCl), des ions (l'ion OCl⁻, l'ion peroxydinitrite ONOO⁻), et des radicaux libres (le radical hydroxyle •OH, l'anion superoxyde O₂⁻, l'oxyde nitrique •NO) (Siegel *et al.* 2008).

Enfin, dans leurs études, Siegel *et al.* (2008), Fletcher et Van Der Graaf (2011) et Ardkapan *et al.* (2011) soulignent la non pertinence des essais utilisés par les fabricants pour étayer la preuve de l'efficacité de leurs produits. En effet, ces tests sont souvent des tests de dégradation ou en passage unique qui ne sont donc pas représentatifs d'une utilisation en conditions réelles. De plus, ces tests n'intègrent pas la mesure de polluants secondaires générés par les interactions avec les polluants de l'air intérieur. Comme le souligne Siegel *et al.* (2008) dans sa revue, l'efficacité réelle des ioniseurs reste encore à démontrer en conditions réelles d'utilisation.

6.2 Techniques destructrices

Contrairement aux techniques de piégeage, l'objectif des techniques destructrices est d'éliminer les polluants en modifiant leur structure afin d'obtenir des composés sans impact sur la santé humaine. D'après l'étude de marché réalisée, les techniques destructrices les plus courantes sont la photocatalyse et le plasma froid.

6.2.1 Ozonation

L'ozonation est une technique reposant sur la capacité de l'ozone à décomposer les molécules, majoritairement organiques, par oxydation, et à éliminer les micro-organismes contenus dans l'air par effet biocide.

L'étude de marché a permis de recenser 28 dispositifs utilisant l'ozonation, soit moins de 6 % des produits. Pour 50% de ces dispositifs, l'ozonation est couplée à une autre technologie. L'ozonation est utilisée majoritairement dans les épurateurs autonomes ; seul un ozonateur intégré dans un climatiseur a été recensé.

Aucune donnée récente sur l'utilisation des générateur d'ozone en tant qu'épurateurs d'air n'a été recensée dans la littérature scientifique, à l'exception de rapports de l'US-EPA (US-EPA 2009, 2014) et du Cal-EPA (Cal-EPA 2006).

D'après le rapport de l'US-EPA de 2009 sur les épurateurs d'air autonomes (US-EPA 2009) et un document résumant l'évaluation de l'efficacité et des effets sur la santé des ozonateurs commercialisés en tant qu'épurateurs d'air (US-EPA 2014), l'ozone a peu de potentiel pour éliminer les composés odorants, virus, bactéries, moisissures à des concentrations sans effet sur la santé humaine. Par conséquent, l'ozonation apparaît peu efficace pour réduire la pollution de l'air intérieur. Par ailleurs, ce rapport de l'US-EPA souligne que certaines études montrent que les générateurs d'ozone peuvent entraîner des concentrations d'ozone dans l'air trop élevées, même si les épurateurs sont utilisés suivant les prescriptions d'usage. Santé Canada a également mis en garde la population contre l'utilisation domestique de purificateurs d'air conçus pour produire de l'ozone sur son site internet (Santé Canada 2012).

L'agence de protection de l'environnement de la Californie a évalué en 2006, les émissions d'ozone de quatre épurateurs d'air autonomes commercialisés intégrant un générateur d'ozone, à la sortie des dispositifs et dans une pièce (Cal-EPA 2006). La pièce contenait un bureau et une chaise ; la température, l'humidité et le taux de renouvellement d'air correspondaient aux conditions généralement rencontrées dans l'habitat. Le fonctionnement des quatre épurateurs a entraîné une augmentation de la concentration en ozone au-delà des limites sanitaires recommandées pour l'air ambiant (90 ppb sur 1 heure et 70 ppb sur 8 heures, en Californie – valeur guide OMS sur 8 heures : 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ soit environ 47 ppb) (Tableau 7).

Tableau 7 : Synthèse des résultats de l'étude Cal-EPA (2006)

	Puissance de fonctionnement	Concentration maximale moyenne sur 1 heure dans la pièce (ppb)	Durée pour atteindre 70 ppb (min)	Durée pour atteindre 90 ppb (min)
Modèle 1 (ozonation + ionisation)	Faible	1 ^a	ND ^b	ND
	Moyenne	88	28	ND
Modèle 2 (ozonation + ionisation négative)	Faible	96	42	135
	Haute	99	111	162
Modèle 3 (ozonation + lampe UV)	Intermittente	119	6	7
	Continue	435	6	7
Modèle 4a	En marche	109	18	31
Modèle 4b ^c	En marche	149	15	20

^a – l'épurateur était réglé sur ventilation faible, avec l'ozonateur à la puissance minimale.

^b – ND : l'épurateur n'a jamais atteint le niveau mentionné

^c – deux épurateurs du modèle 4 ont été testés pour mesurer la variabilité inter-produit.

Au-delà des effets intrinsèques de l'ozone sur la santé humaine, l'ozone peut également réagir avec les polluants de l'air intérieur pour former des polluants secondaires (US-EPA 2014). Par exemple, US-EPA (2014) cite une étude en laboratoire de Weschler (Weschler, Hodgson, et Wooley 1992), où de l'ozone était en présence de polluants émis par une nouvelle moquette. Cette étude montre que l'ozone introduit dans la chambre d'essai a pu éliminer certains composants, dont les composants odorants. Cependant la réaction entre l'ozone et les composés odorants émis par la moquette, a produit de nombreux aldéhydes et au final la concentration en COV_{totaux} a augmenté. De plus, l'ozone en présence de formaldéhyde peut entraîner la formation d'acide formique. Le rapport du Cal-EPA (Cal-EPA 2006) souligne que l'ozone ne détruit pas réellement les composés odorants, mais qu'il masque les odeurs de par son effet sur le système olfactif. Enfin, en présence de terpènes comme le limonène et le pinène, l'ozone entraîne une augmentation significative de la concentration en particules ultrafines.

6.2.2 Plasma

Le plasma froid est une technique qui consiste en la minéralisation des molécules organiques au travers de réactions d'oxydation initiées par les radicaux libres produits dans un champ ionisant.

D'après l'étude de marché, cette technologie est utilisée dans 12% des appareils retrouvés sur le marché français, soit dans 35 épurateurs autonomes (7% des épurateurs autonomes recensés) et dans 23 climatiseurs (38% des climatiseurs recensés). Elle est généralement couplée à d'autres technologies, comme la filtration ou l'ionisation. Les revendications d'efficacité portent sur les composés organiques volatils et les odeurs.

De nombreux travaux de recherche ont déjà étudié la destruction de COV par le plasma non thermique et montrent une certaine efficacité. Cependant, peu d'essais ont été réalisés en conditions réelles ou en conditions qui s'en approcheraient.

6.2.2.1 Effets sur la perception de la qualité de l'air

Trois études évaluant la perception de la qualité de l'air par des panels en présence d'épurateurs revendiquant une épuration par un plasma ont été recensées.

a) Fang et al. (2011)

Fang *et al.* (2011) ont étudié la performance d'un appareil commercialisé fonctionnant sur le principe du plasma froid utilisé en conditions proches de la réalité. Les auteurs ne précisent ni les références de cet appareil, ni si d'autres technologies que le plasma contribuent à son efficacité. Afin d'évaluer cette performance, ils ont recruté 32 étudiants de l'Université Technique du Danemark (*Danmarks Tekniske Universitet*) qui devaient évaluer la qualité de l'air perçue immédiatement après l'exposition. Deux expériences ont été conduites, pendant 10 jours, en parallèle, la première dans deux chambres d'essais en acier de 26,8 m³ et la seconde dans deux pièces de 57,6 m³ ventilées par un système de ventilation centralisé.

Dans l'expérience conduite dans les chambres d'essais, cinq conditions ont été testées dans les deux chambres, avec l'épurateur (450 m³.h⁻¹) en fonctionnement et à l'arrêt :

1. en présence de 3 personnes, assises dans la chambre,
2. en présence de matériaux de constructions et de décoration (moquette, panneaux de particules et linoléum),

3. en présence d'un appareil faisant circuler l'air dans un filtre à particules préalablement utilisé pendant 6 mois,
4. en présence de vapeur d'éthanol (10 mg.m^{-3}) et d'isopropanol (13 mg.m^{-3}),
5. dans la chambre vide.

Dans l'expérience conduite dans les pièces, plusieurs sources ont été utilisées en même temps, identiques à celles utilisées dans l'expérience en chambre d'essai : 3 personnes, matériaux de construction et de décoration et appareil faisant circuler l'air dans un filtre à particules préalablement utilisé pendant 6 mois.

Plusieurs conditions de ventilation ont également été testées, avec deux épurateurs ($450 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ chacun) par pièce en fonctionnement et à l'arrêt :

- dans la pièce vide, à $1,4 \text{ h}^{-1}$,
- en présence des sources de pollution, à $0,6 \text{ h}^{-1}$,
- en présence des sources de pollution, à $1,4 \text{ h}^{-1}$,
- en présence des sources de pollution, à 2 h^{-1} ,
- en présence des sources de pollution, à 6 h^{-1} .

Dans les deux expériences, les sources de pollution n'étaient pas visibles pour les sujets évaluant la qualité de l'air et les sources de pollution et taux de ventilation avaient été déterminés dans une étude pilote afin de recréer des niveaux d'exposition réels. Ces niveaux ne sont toutefois pas précisés dans la publication pour tous les polluants. Par ailleurs, la publication ne précise pas si les essais conduits avec les appareils à l'arrêt ont été conduits avec des appareils factices munis uniquement de la fonction ventilation ou si l'appareil était effectivement à l'arrêt. La seconde hypothèse pourrait entraîner un biais.

Dans les deux expériences, quelles que soient les conditions d'essais, le pourcentage de personnes insatisfaites de la qualité de l'air, immédiatement après être entrées dans la chambre d'essais ou dans la pièce, était inférieur lorsque l'épurateur fonctionnait. Cependant, l'effet n'était statistiquement significatif que dans les 4 conditions suivantes :

- dans la chambre d'essais vide,
- dans la chambre d'essais en présence de vapeurs d'alcool,
- dans la pièce en présence des sources de pollution et à des taux de ventilation de $0,6$ et 2 h^{-1} .

Ils concluent, que, si l'utilisation de cet épurateur n'entraîne pas une diminution de la perception de la qualité de l'air par des êtres humains, elle ne l'améliore que modestement. L'étude ne mesure pas les polluants secondaires, à l'exception de l'ozone, mesuré à des concentrations négligeables à la sortie de l'appareil. Considérant que le fonctionnement de l'épurateur n'entraîne pas de diminution de la qualité de l'air perçue, les auteurs suggèrent que son fonctionnement n'émet pas de sous-produits dangereux ou à des concentrations qui n'entraînent pas d'odeur. Les auteurs indiquent donc que l'utilisation de ces appareils pourrait améliorer la qualité de l'air perçue et réduire les besoins de ventilation, mais que d'autres études seraient nécessaires pour confirmer ces résultats, avec des épurateurs de même type ou de capacité supérieure, avant de recommander l'usage de ces produits.

La conclusion sur l'absence de produits secondaires néfastes est discutable, car l'absence d'odeur ne signifie pas l'absence de polluants, qu'ils soient néfastes ou pas. Il est important de recommander des mesures de sous-produits lors du fonctionnement des épurateurs en présence de sources de pollution.

b) Zhang et al. (2011)

Une autre expérience également conduite par la même équipe (Zhang et al. 2011) avait pour objectif d'évaluer les symptômes du syndrome des bâtiments malsains et la performance lors de la réalisation de travaux de bureau.

L'expérience s'est déroulée dans une pièce de 113 m² équipée :

- De 8 postes de travail, comprenant chacun bureau, chaise, lampe et ordinateur,
- De 5 épurateurs d'air fonctionnant sur le principe du plasma, munis d'un catalyseur additionnel à la sortie des appareils,
- Et de « boîtes » de pollution contenant de la moquette, des panneaux de particules et du linoléum.

Les tests ont été conduits pendant une semaine avec les appareils en fonctionnement à la vitesse « forte », et pendant une semaine avec les appareils dans lesquels tous les dispositifs, à l'exception du ventilateur, réglé à vitesse « moyenne », avaient été enlevés.

Trente-deux étudiants ont participé à l'étude, chacun participant à deux séances de 5 heures.

L'acceptabilité de la qualité de l'air et l'intensité des odeurs ont été évaluées tout au long de l'expérience par les sujets présents dans la pièce, ainsi que par des visiteurs entrant une première fois dans la pièce, au début de l'expérience, donc en l'absence de bio-effluents, puis une seconde fois. L'acceptabilité de la qualité de l'air, ainsi que les odeurs ont été jugées plus satisfaisantes lorsque les épurateurs étaient en fonctionnement. Cependant, l'acceptabilité de la qualité de l'air jugée par les visiteurs, n'était que modestement améliorée en présence de bio-effluents et de manière non significative. Concernant l'intensité des odeurs, l'amélioration liée à l'utilisation des épurateurs, bien que significative, n'est que très modeste en présence ou en l'absence de bio-effluents.

Concernant les symptômes du syndrome des bâtiments malsains, seule la sécheresse oculaire a été significativement améliorée.

Enfin, concernant la performance lors de la réalisation de travaux de bureau et la fatigue, les résultats n'ont pas montré de différence liée à l'utilisation des épurateurs d'air.

Les auteurs concluent que la qualité de l'air est améliorée et que les résultats de cette étude permettent d'utiliser des épurateurs de ce type dans des bureaux. Ils suggèrent cependant de poursuivre les études sur des périodes plus longues afin de rechercher d'éventuels effets bénéfiques liés à l'utilisation de ces appareils sur du long terme. Ces appareils nécessitent encore des améliorations sur l'efficacité et le volume sonore.

Comme pour l'étude de Fang et al. (2011), les conclusions de l'étude de Zhang et al. (2011) apparaissent un peu « hâtives ». En effet, si l'étude ne montre pas d'effets négatifs de l'utilisation sur de courtes périodes, elle ne recherche pas les polluants secondaires qui pourraient être émis, qui, sans être odorants, pourraient avoir un impact sur la santé à long terme. L'étude ne recommande pas explicitement l'utilisation de ces appareils mais elle conclut qu'en l'état actuel des connaissances ils peuvent être utilisés. Or, en l'état actuel des connaissances, et plus particulièrement de l'absence de connaissance sur les polluants secondaires cette conclusion semble prématurée.

c) Kivity et al. (2009)

L'étude de Kivity *et al.* (2009) était une étude pilote prospective d'intervention, dont l'objectif était d'évaluer l'efficacité d'un épurateur d'air fonctionnant sur le principe du plasma, mais également équipé de filtres HEPA et à charbon actif, chez des patients allergiques, entre autres, aux acariens. Trente patients souffrant de rhinite allergique et 10 d'asthme allergique (dont 6 souffrant des deux) ont été recrutés dans des centres spécialisés dans le traitement de l'allergie situés dans le nord, le sud et le centre d'Israël. L'étude s'est déroulée sur plusieurs saisons, 8 semaines consécutives par patient. Les 8 semaines étaient divisées en 3 phases :

- 2 semaines, au début, sans l'épurateur,
- 4 semaines avec l'épurateur placé dans la chambre, à proximité du lit,
- 2 semaines, de nouveau sans l'épurateur.

Un bilan de santé et un questionnaire ont été faits au début de l'étude, puis le patient devait compléter des questionnaires pendant les 8 semaines d'étude. Les patients asthmatiques devaient en plus noter dans un carnet leurs symptômes, le nombre de bouffées d'albuterol et le débit expiratoire maximal mesuré deux fois par jour.

Lors de l'utilisation de l'épurateur, les résultats montrent une amélioration statistiquement significative des symptômes chez les patients souffrant de rhinite, ainsi que chez ceux souffrant d'asthme. Ces résultats d'après les questionnaires sont confirmés par l'examen physiologique, pour les patients asthmatiques. Lors des deux semaines suivant l'utilisation de l'appareil, une amélioration a également été notée, par rapport à la première phase de l'étude, mais moindre, et statistiquement non significative. Les auteurs suggèrent que la diminution de l'inflammation lors de la période d'utilisation de l'épurateur est responsable de l'amélioration observée lors des deux semaines suivantes.

Kivity *et al.* (2009) citent d'autres études sur cet appareil, qui ont montré une amélioration de la qualité de vie de patients allergiques à des allergènes intérieurs.

Cette étude est intéressante car un examen physiologique complète la perception des symptômes des patients. Une étude avec des épurateurs placebo aurait permis de confirmer ces résultats.

6.2.2.2 Effets sur les polluants chimiques et les particules

a) Ardkapan et al. (2011)

Ardkapan *et al.* (2011) ont conduit des essais sur un épurateur fonctionnant sur le principe du plasma froid ($140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), (cf. paragraphe 6.1.1.2), dans une chambre propre avec une concentration faible en particules ultrafines. Cet appareil est commercialisé mais les auteurs ne mentionnent pas les références et ne précisent pas si la technologie du plasma froid est associée ou non à une autre technologie.

L'essai a duré 6 heures, dont 1 heure de mesures avant la mise en marche de l'appareil.

La concentration en ozone augmente dès la mise en marche de l'appareil, pour atteindre un état stationnaire à 28 ppb après une à deux heures fonctionnement, quelle que soit la saison.

La concentration en particules ultrafines augmente lorsque la concentration en ozone approche de son état stationnaire, jusqu'à $20\,000 \text{ PM} \cdot \text{cm}^{-3}$ en été et $5\,000 \text{ PM} \cdot \text{cm}^{-3}$ en automne.

Ces essais ont également été menés dans un conduit, c'est à dire avec un passage unique de l'air dans l'appareil. Les résultats montrent que l'augmentation de la concentration en ozone était moindre et que la concentration en particules diminuait. Les auteurs concluent que les tests avec un passage unique de l'air dans l'épurateur ne sont pas adaptés à l'évaluation de la production d'ozone lors du fonctionnement de l'appareil dans une pièce.

Concernant l'augmentation de la concentration en particules ultrafines, les auteurs émettent l'hypothèse d'une formation de particules lors de la réaction de l'ozone avec des composés organiques volatils, certaines études ayant montré que le limonène et l' α -pinène pouvaient réagir avec l'ozone pour former des particules ultrafines.

b) Ardkapan, Afshari, et Bergsøe (2015)

Dans une autre étude Ardkapan, Afshari, et Bergsøe (2015) ont évalué l'efficacité de cinq épurateurs d'air autonomes, dont un plasma froid, dans un bureau (chapitre 6.1.1.2). Lors de l'utilisation de l'épurateur à plasma, la concentration en ozone a augmenté de 10-15 ppb à 52 ppb et celle des particules ultrafines n'a pas significativement évolué. Comme pour l'ionisateur, l'auteur souligne que contrairement à d'autres études, l'augmentation de la concentration en ozone n'a pas entraîné d'augmentation de la concentration en particules. La concentration en COVt était d'environ 1,75 ppm, l'auteur fait l'hypothèse que la concentration en COV insaturés n'était pas suffisante pour que ces molécules réagissent avec l'ozone et forment des particules.

c) Park et al. (2011)

Park *et al.* (2011) ont étudié l'efficacité sur des particules d'un épurateur autonome fonctionnant sur le principe du plasma, mais également équipé d'un filtre électrostatique. Trois types de poussières ont été testés : tabac, sable jaune et pollens, qui sont des polluants de l'air intérieur communs en Asie. Les tests se sont déroulés dans une pièce de 150 m³, avec une concentration en poussières de 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Chaque type de poussières a été testé sans l'épurateur en fonctionnement, pour mesurer la décroissance naturelle, et à différents débits de l'épurateur (780 m³.h⁻¹, 900 m³.h⁻¹, 1020 m³.h⁻¹).

Les résultats montrent que pour réduire la concentration de 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (critère de qualité de l'air intérieur en Corée), au débit maximal de l'épurateur, il faut 40 minutes pour le tabac, 28 minutes pour les poussières de sable jaune et 5 minutes pour les pollens. Les particules les plus grosses sont ainsi éliminées plus rapidement.

La concentration décroît de manière exponentielle avec le temps. Dans cet essai, où l'air passe plusieurs fois dans le système, la vitesse de décroissance augmente avec le débit de ventilation, alors que dans des essais à passage unique, l'abattement diminue souvent avec l'augmentation du débit.

Les publications répertoriées ci-dessous présentent des tests qui n'ont pas été conduits en conditions réelles ou s'en approchant, notamment parce que les mesures ont été faites directement à la sortie du dispositif expérimental. Ils apportent cependant des informations intéressantes sur la capacité à traiter des polluants par le plasma, car il n'y a pas d'autre technologie associée, ainsi que sur des polluants secondaires qui pourraient être émis.

d) Schmid, Jecklin, et Zenobi (2010)

La publication de Schmid, Jecklin, et Zenobi (2010) présente les résultats d'une étude de la dégradation de composés organiques volatils par un dispositif d'épuration d'air commercialisé utilisant le plasma froid. Ce dispositif n'est pas autonome, il est destiné à être installé dans un climatiseur, un appareil autonome... Cette étude, apporte des informations sur l'efficacité du dispositif dans différentes conditions. Les vapeurs de plusieurs hydrocarbures (cyclohexène,

benzène, éthylbenzène et xylènes) ont été injectées dans le dispositif d'épuration d'air à plasma froid. L'étude fait varier quelques paramètres :

- Débit : 320 et 640 L.min⁻¹ (soit environ 19 et 38 m³.h⁻¹)
- Concentration : 1,5.10⁷ M, 3,1.10⁷ M, 4,6.10⁷ M

Les analyses des prélèvements d'air réalisés en sortie de cet épurateur ont permis d'estimer l'efficacité de dégradation des COV de ce système. L'efficacité d'épuration a été évaluée à 11 % pour le cyclohexène et le toluène, à moins de 2 % pour le benzène, à 3% pour l'éthylbenzène et 4 % pour les xylènes. D'après les auteurs, considérant la consommation d'énergie de l'appareil, 17,3 W, ce résultat est correct. Ils soulignent cependant que des études montrent que des dispositifs couplés à des catalyses hétérogènes peuvent être plus performants, à des consommations d'énergie plus faibles. Cependant, le catalyseur doit être entretenu, ce qui n'est pas le cas des appareils qui n'utilisent que le plasma froid.

Concernant l'influence du débit, l'efficacité du dispositif était meilleure au faible débit (11% à 320 L.min⁻¹ et 8 % à 640 L.min⁻¹), ce qui était le résultat attendu puisque les molécules sont dans le plasma pendant une durée plus longue lorsque le débit est faible.

Concernant l'influence de la concentration, l'efficacité était meilleure à la dose la plus faible, 11% pour le cyclohexène à 1,5.10⁷ M et 4% à 4,6.10⁷ M. Les auteurs émettent l'hypothèse que le nombre de molécules actives (ozone, radicaux...) produites dans le plasma est insuffisant par rapport à la durée de présence des molécules dans le dispositif. En effet, augmenter la concentration de polluants à traiter sans modifier le débit et/ou la puissance électrique du dispositif conduit à une diminution de l'efficacité.

Les analyses réalisées ont également permis d'identifier que plusieurs produits de dégradation étaient émis par l'épurateur, en particulier des alcools, des aldéhydes, des cétones et un époxyde. Ces sous-produits sont le résultat de réactions des COV avec l'ozone et les radicaux libres formés dans le plasma.

e) Shimizu (2011)

Shimizu (2011) a fait une synthèse de données sur les microplasmas dans le traitement de la pollution de l'air intérieur, basées sur des dispositifs expérimentaux dans des essais en passage unique. Les résultats varient en fonction des dispositifs expérimentaux (variation de la source d'énergie). Ainsi, deux dispositifs sont testés pour le traitement du formaldéhyde, à des concentrations initiales de 0,707 et 0,768 ppm. Dans les deux essais, l'abattement du formaldéhyde augmente avec la puissance du microplasma, de manière non linéaire de 0 % jusqu'à environ 96 % pour une puissance de 0,8 à 1,3 kV mais avec des courbes différentes en fonction des dispositifs. De même pour l'émission d'ozone, mais avec une émission de 12,1 ppm à 1,3 kV pour un dispositif alors qu'elle est de 3,81 avec le second à 0,8 kV. Un des dispositifs génère également des NOx. Dans une autre étude toujours avec un microplasma en présence formaldéhyde, Shimizu (2011) a observé la formation de CO₂, CO et N₂O en l'absence d'humidité et d'acide formique en présence d'humidité.

f) Bahri et Haghghat (2014)

Enfin, Bahri et Haghghat (2014) ont réalisé une revue de la littérature sur les plasmas et systèmes de plasma-catalyse. Cette revue présente les différents systèmes de plasma et plasma-catalyse d'un point de vue technique, leurs performances vis-à-vis des COV et les limites de ces technologies pour l'épuration de l'air intérieur. Concernant la technique du plasma froid, les auteurs concluent que cette technique n'est pas viable pour l'épuration de l'air intérieur. En effet, si le plasma froid a la capacité de réduire les concentrations d'une large gamme de COV (1 -

10 000 ppm), gaz acides (i.e. NO_x, SO_x), particules et bactéries à température ambiante, son implémentation peut générer des polluants tels que l'ozone et des oxydes d'azote, et l'oxydation incomplète des polluants peut entraîner la formation de sous-produits (CO, composés organiques) qui peuvent être plus nocifs que les polluants primaires. Le Tableau 8 résume l'abattement des COV et les polluants secondaires observés. Par ailleurs, bien que consommant moins d'énergie que le plasma chaud, le plasma froid a un rendement énergétique faible, particulièrement pour les faibles concentrations en COV. Enfin, l'humidité relative a un impact fort sur l'efficacité des dispositifs.

Tableau 8 : Abattements de COV et sous-produits observés à partir de la revue de Bahri et Haghghat (2014)

Polluants cibles	Gaz porteur	Concentrations (ppm)	Débit (L.min ⁻¹)	Efficacité d'élimination (%)	Sous-produits formés	Concentrations (ppm)
Toluène	Air	2 000	1	90	Particules d'aérosol	N/D
Trichloroéthylène				40	Particules d'aérosol, Cl ₂	
Toluène	Air	280	5	Jusqu'à 97	CO aérosol	500 N/D
Butyl acetate		120	20	Jusqu'à 75	CO	N/D
Toluène	N ₂ + 20% O ₂	100	0,5	-85 ^a	CO	N/D
CH ₂ Cl ₂		109		85 ^a	CO, formaldéhyde, acide acétique	
Mélange toluène + CH ₂ Cl ₂		100 + 109		N/A	Chlorforme, benzène	0,5 0,4
Toluène	N ₂ + O ₂	800	0,07	60	O ₃ , CO, CO ₂ , NO _x (NO, NO ₂), acide formique, acide acétique, benzène	N/D
Formaldéhyde	Air sec	2,2	6	42	O ₃	282
	Air + 30 % HR			54		162
	Air + 70 % HR			57		157
Toluène	80 % N ₂ + 20% O ₂	240	0,315	36	CO	8 %
					O ₃	8
Toluène	N ₂ + 5 % O ₂	50	100	-52 ^a	CO	N/D
	N ₂ + 5			73,1		

Polluants cibles	Gaz porteur	Concentrations (ppm)	Débit (L.min ⁻¹)	Efficacité d'élimination (%)	Sous-produits formés	Concentrations (ppm)
	% O ₂ + 0,2 % H ₂ O					
Acétone	Air + N ₂	200	2,5	38	N/A	N/D
Benzène				56		
Tétrahloroéthylène				74		
<i>m</i> -Xylène				98		
Mélange				N/A		
Mélange BTX (benzène, toluène, <i>p</i> -xylène)	Air	1,5	6	-60 ^a	CO, O ₃ , NO _x (NO; NO ₂ ; N ₂ O; N ₂ O ₅), acide formique, benzaldéhyde, alcool benzylique	>35 % ^a 46,7 (0; 1,380 ; 0 ; 0)
		1,4		-93 ^a		
		1,2		~100 ^a		
Toluène	Air sec	0,5	10,8	70	O ₃ NO NO ₂	49,9 <0,01 1,5
	Air + 27 % HR			-80 ^a	O ₃ NO NO ₂	31,2 < 0,01 0,8
Toluène	Air sec	0,5	10	46	O ₃ , acide formique, benzaldéhyde, acide benzoïque, alcool benzylique, 4-méthyle-2- propyle furane, 5-méthyl-2- nitropryl furane, 3-méthyl-4-	55-75 ^a N/D
	Air + 26 % HR			57		
	Air + 50 % HR			26		

Polluants cibles	Gaz porteur	Concentrations (ppm)	Débit (L.min ⁻¹)	Efficacité d'élimination (%)	Sous-produits formés	Concentrations (ppm)
					nitrophénol, 4-méthyl-4-nitrophénol, 4-nitrophénol 2-méthyl-4,6-dinitrophénol	

^a : concentrations approximatives à partir de graphiques

N/D non disponible

6.2.2.3 Effets sur les polluants biologiques

a) Brenier-Pinchart et al. (2009)

Brenier-Pinchart *et al.* (2009) ont étudié l'efficacité sur les champignons filamenteux d'un épurateur commercialisé, conçu pour les hôpitaux. Cet épurateur combine une préfiltration F6 et à charbon actif, une filtration HEPA, un plasma et une nano-filtration électrostatique. Dans une précédente étude, l'efficacité avait été démontrée, cependant, les patients s'étaient plaints du bruit excessif de l'appareil. L'objectif de cette étude était d'évaluer cette efficacité au débit minimum, 450m³.h⁻¹, en l'absence de soins. L'étude s'est déroulée pendant 6 semaines dans deux services d'hématologie. Des prélèvements d'air et de surface ont été effectués dans 36 chambres en présence et en l'absence de l'épurateur. Dans les deux services, la contamination fongique était inférieure dans les chambres traitées par l'épurateur, de manière statistiquement significative, avec un abattement moyen de 86 % pour les prélèvements de surface et de 80 % pour les prélèvements d'air. Ces résultats sont toutefois moins bons que ceux de la précédente étude, lorsque l'épurateur avait été utilisé au débit maximal de 1000 m³.h⁻¹. Les auteurs soulignent qu'il n'existe pas de seuil de concentration fongique normalisé en dessous duquel le risque d'infection peut être écarté. Cependant, les concentrations mesurées dans cet essai sont trop élevées pour écarter tout risque de contamination. Une utilisation à un plus haut débit doit donc être privilégiée et les mesures de prévention doivent être maintenues.

b) Fréalle et al. (2011)

Ce même épurateur a fait l'objet d'une autre étude par Fréalle *et al.* (2011). Il a été placé dans une pièce de 42 m³, sans ventilation extérieure, dans laquelle 10⁶ *A. niger conidia* ont été aérosolisées pendant 20 minutes.

La concentration initiale en *A.niger* était supérieure à 260 UFC.m⁻³. Après 10 minutes de fonctionnement la concentration était de 6,5 ± 3,3 UFC.m⁻³ et à 1,2 ± 1,3 UFC.m⁻³ à 20 minutes. La concentration continue de décroître jusqu'à la fin de l'essai (2h) pour atteindre une concentration proche de 0. Cependant d'autres espèces fongiques qui avaient été détectées avant l'essai sont encore présentes à l'issue des 2 heures d'essai, 2,2 ± 1,9 UFC.m⁻³. Cette étude confirme l'efficacité de cet épurateur muni d'un plasma, destiné au milieu hospitalier. Trois autres épurateurs mobiles, également destinés au milieu hospitalier, ont été testés suivant le même protocole. L'épurateur muni d'un plasma est aussi efficace que l'épurateur fonctionnant uniquement sur le principe de la filtration. Les auteurs soulignent que l'avantage du plasma par rapport à la filtration est la destruction des espèces fongiques, alors qu'elles s'accumulent dans les filtres HEPA, ce qui nécessite une maintenance et peut affecter les performances. Le désavantage

serait la dispersion de particules chargées dans l'air, dont les conséquences sont inconnues. En conclusion, si les épurateurs ne permettent pas de réduire la pénétration des contaminants fongiques, contrairement à une pression positive, ils peuvent contribuer à la diminution de l'exposition des patients, en addition avec d'autres mesures préventives.

c) Shimizu (2011)

Dans sa synthèse Shimizu (2011) a également considéré l'effet des microplasmas sur les bactéries et virus. Ainsi des *Escherichia coli* et *Bacillus subtilis* ont été nébulisés et injectés dans le microplasma à 8,5 L.min⁻¹. L'efficacité du microplasma est meilleure sur les *Escherichia coli* que sur les *Bacillus subtilis* et augmente avec la puissance.

6.2.2.4 Conclusions

Les publications analysées montrent que les épurateurs fonctionnant sur le principe du « plasma », mais généralement couplé à d'autres techniques comme la catalyse (Fang *et al.* 2011), les filtres HEPA et charbon (Kivity *et al.* 2009) ou les filtres électrostatiques (Park *et al.* 2011) peuvent diminuer les concentrations en particules, COV, microorganismes. Mais ils sont également source de pollution en fonction des conditions d'utilisation notamment. Le fait que les dispositifs utilisés soient équipés de plusieurs technologies ne permet pas de conclure sur la technologie « plasma » seule. Cependant, comme mentionné en introduction, dans le commerce les appareils munis de générateur de plasma utilisent également d'autres technologies.

Concernant l'effet des épurateurs « plasma » sur la perception de la qualité de l'air, les études de Fang *et al.* (2011) et Zhang *et al.* (2011) montrent que ces derniers peuvent améliorer la qualité de l'air perçue mais de manière modeste, particulièrement lorsque le taux de renouvellement de l'air est faible. Toutefois, dans ces études il n'y a pas eu de mesures des COV présents dans la pièce, il n'est donc pas possible de conclure sur une amélioration de la qualité de l'air. Il est montré cependant que l'épurateur est efficace à *a minima* sur certains composés odorants, ce qui pourrait sembler être un résultat « positif », mais si la dégradation de ces composés est incomplète des composés potentiellement plus nocifs pourraient être émis.

Concernant les effets sur la santé, la seule étude d'intervention recensée (Kivity *et al.* 2009), montre que l'utilisation d'un épurateur dans la chambre, chez des patients allergiques aux acariens, a permis une amélioration des symptômes de rhinites et d'asthmes. Cette amélioration a été mesurée par questionnaires et par la mesure bi-quotidienne du débit expiratoire maximal chez les patients asthmatiques. Cette étude montre que l'amélioration des symptômes persiste deux semaines après le retrait de l'épurateur. Dans leur publication, Kivity *et al.* (2009) citent d'autres études qui confirment ces résultats. Ces résultats pourraient être consolidés par le même type d'étude qui utiliserait également des épurateurs « placebo ».

Concernant le traitement des particules, les résultats ne sont pas homogènes et ne permettent pas de conclure sur la capacité des plasmas à éliminer les particules de l'air intérieur (tabac, sable jaune et pollens). En effet, si l'étude de Park *et al.* (2011) montre que l'épurateur est efficace, la présence d'un filtre électrostatique en plus du plasma pourrait suggérer que les particules sont collectées par ce dernier.

Par ailleurs, si l'épurateur émet de l'ozone et que des terpènes sont présents dans l'air intérieur, la concentration en particules fines risque d'augmenter (Arđkapan *et al.* 2011). Concernant l'efficacité sur les COV, le plasma peut également dégrader des COV comme le formaldéhyde (Shimizu, Blajan, et Kuwabara 2011), le cyclohexène, le benzène, l'éthylbenzène et les xylènes (Schmid, Jecklin, et Zenobi 2010). Les essais décrits dans ces deux publications n'ont pas été réalisés dans des conditions proches de la réalité : d'une part les polluants étaient mesurés directement à la sortie de l'appareil, donc suite à un passage unique, et d'autre part, il s'agissait d'un dispositif

expérimental ou destiné à être intégré dans une climatisation. Néanmoins les résultats sont intéressants car ils démontrent, d'une part la capacité de la technologie « plasma », seule à réduire certains polluants organiques, et d'autre part des polluants secondaires ont été recherchés dans les prélèvements en la sortie de l'appareil. Ainsi la dégradation du formaldéhyde entraîne la formation d'acide formique, de monoxyde de carbone et le fonctionnement du dispositif entraîne la formation d'ozone et d'oxydes d'azote. Les quantités d'ozone et d'oxydes d'azote formés augmentent avec la décharge appliquée. Les analyses réalisées dans l'étude de Schmid, Jecklin, et Zenobi (2010) ont permis d'identifier des alcools, des aldéhydes, des cétones et un époxyde. Ces sous-produits sont le résultat de réactions des COV avec l'ozone et les radicaux libres formés dans le plasma.

Concernant les biocontaminants, un appareil conçu pour les hôpitaux équipé d'une fonction plasma, mais également de fonctions de filtration (électrostatique, HEPA, charbon actif) et de catalyse, a été testé par Brenier-Pinchart *et al.* (2009) et Fréalle *et al.* (2011) sur les moisissures filamenteuses dans des services d'hématologie. L'appareil a permis avec un abattement moyen de 86 % pour les prélèvements de surface et de 80% pour les prélèvements d'air, en fonctionnant à $450\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Les auteurs précisent que ces performances étaient inférieures à celle mesurées dans des études antérieures au débit de $1000\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Brenier-Pinchart *et al.* 2009).

Le débit de ventilation joue un rôle dans l'efficacité de ces dispositifs. Lorsque les essais sont réalisés dans des conditions se rapprochant de la réalité avec de multiples passages de l'air dans l'épurateur, les études montrent que la performance est améliorée avec l'augmentation du débit de l'épurateur (Brenier-Pinchart *et al.* 2009, Park *et al.* 2011). C'est l'inverse qui est observé dans les études mesurant les polluants à la sortie de l'épurateur (Schmid, Jecklin, et Zenobi 2010). En effet, l'augmentation du débit diminue la durée du contact des polluants avec les molécules actives produites dans le plasma, donc réduit l'efficacité lors d'un passage unique. Mais dans des essais en conditions réelles, l'augmentation du débit entraîne une augmentation du nombre de passages dans le plasma et augmente donc l'efficacité.

Enfin, l'humidité relative a un effet sur l'efficacité du système, par exemple des études montrent que l'élimination du toluène et du formaldéhyde augmente avec l'humidité relative, alors que pour le méthanol, elle diminue (Luengas *et al.* 2015).

La revue de la littérature de Bahri et Haghighat (2014) sur les plasmas conclut que les plasmas froids ont la capacité de réduire les concentrations d'une large gamme de COV (1 - 10 000 ppm), gaz acides (i.e. NO_x , SO_x), particules et bactéries à température ambiante. Toutefois, bien que consommant moins d'énergie que le plasma chaud, le plasma froid a une efficacité énergétique faible au regard des concentrations en COV retrouvées dans l'air intérieur.

Si le plasma est une technologie qui peut sembler prometteuse pour certains auteurs, pour d'autres non. En principe, la décomposition des composés doit conduire uniquement à la formation de CO_2 et O_2 . Cependant dans la pratique « réelle » et même dans certaines études en laboratoire, elle peut conduire à des oxydations incomplètes et par conséquent à la formation de polluants secondaires qui peuvent être plus nocifs que les polluants primaires visés. Par ailleurs, la technologie peut émettre de l'ozone, qui, au-delà de ses propriétés irritantes, peut également entraîner la formation de particules ultrafines en réagissant avec les terpènes présents dans les environnements intérieurs.

6.2.3 Plasma-catalyse

Pour améliorer les performances des plasmas froids, des catalyseurs ou photocatalyseurs avec ou sans source d'UV peuvent être ajoutés. La combinaison de ces deux technologies est plus performante que les deux technologies seules (Bahri et Haghighat 2014). Cette synergie entre ces

deux technologies peut être liée à la capacité du catalyseur à adsorber le polluant ; si celle-ci est significative, le temps de rétention est augmenté ce qui améliore l'efficacité globale du système (Vandenbroucke *et al.* 2011).

Le catalyseur peut être soit dans la zone de la décharge (catalyse dans le plasma), soit situé après celle-ci (catalyse post plasma) (Bahri et Haghghat 2014). La combinaison de ces deux technologies permet notamment de minimiser les émissions de NO₂ et O₃. Bahri et Haghghat (2014) concluent que si ces systèmes sont plus efficaces que les plasmas froids classiques, avec un meilleur rendement énergétique et une émission moindre de polluants secondaires, ils nécessitent encore des recherches complémentaires pour une application à la pollution de l'air intérieur, notamment à de faibles concentrations.

Le Tableau 9 résume l'abattement des COV et les polluants secondaires observés dans des systèmes de plasma-catalyse.

Tableau 9 : Abattements de COV et sous-produits observés à partir de la revue de Bahri et Haghghat (2014)

Catalyseur	Polluants cibles	Gaz porteur	Concentration (ppm)	Débit (L.min ⁻¹)	Efficacité d'élimination (%)	Sous-produits formés	Concentration
MnO ₂ -FeO ₃	Toluène	20 % O ₂ + 80 % N ₂	240	0,315	76	O ₃ , CO	3,9 ppm, 16,5 %
MnO ₂ /Al ₂ O ₃					88		14,6 ppm, 14,0 %
MnO/AC					99,7		8 ppm, 24,8 %
NaY	Toluène	20 % O ₂ + 80 % N ₂ + 0,5 % H ₂ O	200	0,5	78	O ₃ , CO	0,2.10 ⁻³ mol, N/A
HY					87		0,3.10 ⁻³ mol, N/A
γ- Al ₂ O ₃	Carbowax éthane-1,2-ol (C ₂ H ₆ O ₂)	Air	200	0,1	77	O ₃	0
α- Al ₂ O ₃					100		N/A
γ- Al ₂ O ₃					N/A	N/A	
α- Al ₂ O ₃ + γ- Al ₂ O ₃							45
Pt/ Al ₂ O ₃	2-heptanone	Air sec	180	0,42	98	CO, O ₃ , NO _x	36 %; N/A, < 10 ppm
		Air + 3 % H ₂ O			86		26 %, N/A, < 10 ppm
3 wt.% MnO _x /SMF	Isopropanol	Air	100	0,5	100	O ₃	N/A
CO ₃ O ₄ /Al ₂ O ₃ /Ni	Toluene	N ₂ + 5 % O ₂	50	0,1	96	CO	N/A
MnO _x /Al ₂ O ₃	Formaldéhyde	Air + 30 % HR1	2,2	6	87	O ₃	14 ppm
MnO _x /	Mélange BTX	Air + 25 %	1,5	6	94	O ₃	1,9 ppm

Catalyseur	Polluants cibles	Gaz porteur	Concentration (ppm)	Débit (L.min ⁻¹)	Efficacité d'élimination (%)	Sous-produits formés	Concentration
Al ₂ O ₃	(benzène, toluène, <i>p</i> -xylène)	HR	1,4 1,2		97 95	NO ₂	40 ppb
CuOMnO ₂ / TiO ₂	Toluène	Air sec	0,5	10,8	78	O ₃	24 ppm
						NO	N/A
						NO ₂	553 ppb
TiO ₂					82 ± 2	O ₃	3,6 ppm
						NO	< 10 ppb
						NO ₂	1295 ppb ^b

MnO _x / Al ₂ O ₃ 5wt. % Mn	Benzène	Air + 30 %	0,470	6	100	O ₃ CO	27,3 – 30 ppm N/A
		Air + 50 % HR			~63 ^b		
	Toluène	Air + 30 % HR	0,810		100		
		Air + 50 % HR			95 ^b		
	<i>p</i> -xylène	Air + 30 % HR	0,730		95		
		Air + 50 % HR			95 ^b		
Pd/ Al ₂ O ₃	toluène	Air	0,5	10	94	O ₃	2,9 ppm
		Air + 74 % HR			39		2,0 ppm

^a SMF : *sintered metal fiber*

^b valeur approximative à partir d'un graphique

Ge *et al.* (2015) ont comparé l'élimination de faibles concentrations de benzène entre un microplasma et un dispositif expérimental combinant un plasma non thermique et un catalyseur post plasma, MnO₂. Le dioxyde de manganèse a la capacité de décomposer le NO₂ et l'O₃ générés par la décharge électrique. Pour les deux systèmes, le taux d'abattement du benzène augmente avec la puissance électrique du dispositif, de 50,3 % (2 W) à 82,9 % (9 W) pour le plasma et de 51,6 % (2 W) à 89,6 % pour le système plasma catalyse. Le meilleur taux d'abattement avec le système plasma-catalyse était le résultat attendu car la dégradation de l'O₃ par le catalyseur entraîne la formation de radicaux O, qui peuvent par la suite oxyder le benzène.

Aucun composé organique intermédiaire n'a été détecté suite à l'utilisation de ces deux dispositifs. Les auteurs précisent toutefois que les limites de détection pourraient ne pas avoir été atteintes considérant la faible concentration initiale de benzène (150 ± 10 ppbv). Une autre hypothèse pourrait être que ces composés ont été absorbés par les particules d'aérosol qui ont été collectées par l'électrode de masse. En effet, les résidus collectés sur cette électrode contenaient du 3-nitro-

phénol pour les deux dispositifs ainsi que du méthanol, du phénol et de l'hydroquinone pour microplasma.

Concernant la formation de NO₂ et d'O₃, en l'absence de benzène, les concentrations augmentent avec le temps pour les deux dispositifs, mais la présence du catalyseur permet de réduire fortement ces émissions. Ainsi au bout de 90 minutes, les concentrations en NO₂ et O₃ étaient respectivement de 234 et 25,3 ppm en l'absence de catalyseur et de 25,7 et 1,3 ppm en présence de catalyseur. Les résultats sont similaires en présence de benzène.

Les épurateurs combinant un filtre adsorbant avec des catalyseurs et un plasma peuvent voir leur efficacité maintenue dans le temps. Tanaka *et al.* (2016) ont présenté les résultats d'un essai de 3 mois sur 2 épurateurs d'air à l'occasion de la conférence Indoor Air de 2016. Les deux épurateurs étaient identiques : pré-filtre + filtre électret (filtre chargé électrostatiquement) + catalyseur « désodorisant », l'un des épurateurs était également muni d'un plasma en amont du filtre adsorbant. Les deux appareils ont été soumis à une faible concentration de formaldéhyde pendant 3 mois. Pour l'épurateur sans plasma, le CADR avait diminué de 37 % après un mois, de 49 % après 2 mois et de 61 % après 3 mois d'utilisation. Alors que pour l'épurateur muni d'un plasma, le CADR n'a diminué que de 15 % après un mois et de 24 % après 2 et 3 mois d'utilisation. Les auteurs concluent que les espèces réactives générées par le plasma peuvent réagir avec le formaldéhyde adsorbé sur le filtre et le régénérer. L'étude ne mesure pas les autres polluants qui pourraient être émis suite à la dégradation du formaldéhyde.

Le plasma peut également être utilisé pour régénérer un catalyseur ou un filtre adsorbant. Ce traitement est dit séquentiel, car lors de la première phase, dite phase de stockage, les polluants sont traités par le catalyseur ou adsorbés par le filtre, puis lors d'une deuxième phase, dite phase de décharge, le filtre ou le catalyseur sont régénérés par un plasma non thermique afin d'éviter la saturation de ces éléments (Bahri et Haghighat 2014, Sultana *et al.* 2015). Les études expérimentales sur ces techniques séquentielles ont fait l'objet d'une revue par Sultana *et al.* (2015). Sultana *et al.* (2015) concluent que, d'après les études expérimentales, ces traitements séquentiels ont montré leur efficacité sur l'abattement des COV et sur la régénération des adsorbants saturés. Cependant si ces systèmes ont été améliorés ces dernières années, ils sont encore perfectibles. Le choix du catalyseur doit combiner une forte capacité d'adsorption et une haute activité catalytique envers les COV adsorbés. Par ailleurs, l'humidité relative a une influence sur l'efficacité de ces systèmes. En effet, les molécules d'eau peuvent entrer en compétition avec les COV pour l'adsorption à la surface du catalyseur, ce dernier doit donc également avoir des propriétés hydrophobes (Bahri et Haghighat 2014).

Les études recensées étant expérimentales, la poursuite de l'étude de ces systèmes séquentiels est nécessaire, notamment afin de mesurer l'efficacité de prototypes commercialisables dans des conditions plus proches de la réalité (mélange de polluants, hauts débits adaptés au traitement d'une pièce, température ambiante, haut niveau d'humidité relative...) (Bahri et Haghighat 2014, Sultana *et al.* 2015).

6.2.4 Photocatalyse

La photocatalyse est une technique d'épuration présente dans 15 % des dispositifs recensés dans l'étude de marché. Son principe repose sur la décomposition de molécules par une succession de réactions chimiques, jusqu'à la minéralisation, suite à l'activation d'un catalyseur par un rayonnement lumineux, souvent UV-A dans les épurateurs d'air autonomes, et par la lumière visible pour les matériaux de construction.

6.2.4.1 Dispositifs passifs

Les matériaux photocatalytiques, comme par exemple des peintures à base de TiO_2 , sont utilisés principalement à l'extérieur des bâtiments pour des façades « autonettoyantes » ou pour la dégradation des oxydes d'azote (Kolarik et Toftum 2012). Le dopage par des oxydes métalliques ou d'azote du TiO_2 lui permet d'être activé lors de l'irradiation par des lumières utilisées dans les espaces intérieurs (Geiss *et al.* 2012).

D'après l'étude de marché, le marché des matériaux de construction et de décoration qui ont une fonction de dépollution de l'air intérieur peut être considéré comme « confidentiel » en France. Vingt-neuf produits ont été recensés dont 8 mettent en œuvre le principe de la photocatalyse (5 peintures, un carrelage et 2 aérosols à pulvériser). Les COV, et particulièrement le formaldéhyde, sont la principale cible de ces produits.

D'après les industriels auditionnés dans le cadre de l'étude de marché, le secteur des peintures qui revendiquent des propriétés d'épuration de l'air intérieur est en expansion. D'après les personnes auditionnées, ce procédé permettrait une amélioration de la qualité de l'air pour un faible coût supplémentaire par rapport à une peinture classique lorsque les travaux sont réalisés par un artisan. De plus, cette technologie présente l'intérêt de ne pas consommer d'énergie.

Il existe actuellement peu d'études qui portent sur l'efficacité de ces peintures concernant l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. D'après Kolarik et Toftum (2012), les études disponibles suggèrent que ces peintures photocatalytiques peuvent dégrader certains types de polluants, cependant les performances en conditions réelles sont encore faillibles.

6.2.4.1.1 Effets sur la perception de la qualité de l'air

Une seule étude sur de la peinture photocatalytique a pu être recensée. Elle a été conduite par la même équipe qui a réalisé les études de perception sur les épurateurs autonomes photocatalytiques décrite dans le paragraphe 6.2.4.1.1 à suivre. Afin d'évaluer l'impact d'une peinture photocatalytique à base de ciment disponible dans le commerce, sur les polluants de l'air intérieur, Kolarik et Toftum (2012) ont réalisé une évaluation sensorielle suivant un protocole similaire aux études (Kolarik et Wargocki 2010, Kolarik *et al.* 2010) décrites dans le paragraphe 6.2.4.1.1. L'étude a été conduite dans deux pièces de 18 m², divisées en trois parties par des cloisons de 2 et 2,4 m de hauteur. La première partie contenait des plaques de plâtre peintes avec la peinture photocatalytique, de 13 m² au total (représentant 23 % de la surface des murs dans la pièce), disposées dans la pièce une semaine avant les essais, et des lampes émettant une combinaison d'UV et de lumière visible. La seconde partie contenait des tables et des chaises pour deux individus, qui sont des sources de bioeffluents, effectuant un travail de bureau, représentant la troisième partie réservée aux sujets participants à l'évaluation sensorielle. Une « boîte de pollution » est constituée avec 1,5 m² de panneaux agglomérés, 4 m² de linoléum et 16 m² d'une moquette âgée de 30 ans issue d'un bureau, où des plaintes sur l'environnement intérieur ont été formulées. Les cloisons séparant les différentes parties n'empêchent pas une homogénéisation de l'air, favorisée par des ventilateurs. Les ventilateurs ont fonctionné en permanence, quelles que soient les conditions d'essais. Le panel sensoriel était constitué de 35 étudiants de l'Université Technique du Danemark, d'une moyenne d'âge de 23,8 ans, regroupant 16 hommes et 19 femmes. Les participants ont été formés et rémunérés pour l'étude. Les essais se sont déroulés sur 5 jours, avec 3 mesures par jour, avant et après des modifications des conditions dans la pièce.

Chaque participant devait entrer une première fois dans la pièce et évaluer immédiatement l'acceptabilité de la qualité de l'air perçue et l'intensité de l'odeur, puis un changement des conditions dans la pièce était effectué, et chaque participant devait de nouveau entrer dans la pièce 45 minutes et 5 heures plus tard. Les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Résultats de l'étude de Kolarik et Toftum (2012)

jour	pièce	Conditions initiales	changement	Comparaison de l'acceptabilité de la qualité de l'air avant et après le changement	
				T0 → T0 +45 min	T0 → T0 + 5 h
1	1	Matériaux de construction (MC) + peinture photocatalytique (PP)	Lumière	↓ p<0,01	↓ p<0,05
2		MC + PP	bioeffluents	↓ p<0,05	NS
3		MC + PP + lumière	bioeffluents	↑ p<0,05	NS
4		MC + PP + lumière + bioeffluents	Emission d'isopropanol	NS	NS
5		Pièce vide	Pas de changement	NS	NS
	2				
1		Pièce vide	MC	NS	↓ p<0,01
2		MC	bioeffluents	NS	↑ p<0,05
3		MC + bioeffluents	Emission d'isopropanol	NS	NS
4		Pièce vide	Pas de changement	NS	NS

NS : non significatif

L'activation de la peinture photocatalytique par la lumière a eu un impact négatif sur la qualité de l'air perçue en présence de matériaux de construction, ce qui suggère que la photocatalyse a entraîné l'émission de sous-produits liée à la dégradation incomplète des polluants. Cette hypothèse est, par exemple, soutenue par l'étude d'Auvinen et Wirtanen (2008), décrite dans le paragraphe 6.2.4.1.2, où une augmentation de la concentration en aldéhydes et cétones avait été mesurée suite à l'activation d'une peinture photocatalytique. L'introduction de bioeffluents a eu un effet mitigé sur la perception de la qualité de l'air, sans lumière la qualité perçue diminue, et avec la lumière elle augmente mais ces effets ne sont significatifs qu'à T0 + 45 minutes. Enfin l'introduction d'isopropanol dans la pièce n'a eu aucun effet.

D'après les auteurs, l'étude ne permet pas de conclure sur la capacité de la peinture photocatalytique à améliorer la qualité de l'air perçue dans une pièce polluée par des matériaux classiquement présents dans des bureaux. Des études complémentaires avec des mesures de polluants associés sont nécessaires.

6.2.4.1.2 Effets sur les polluants chimiques

Aucune étude en conditions réelles n'a pu être recensée. Les études expérimentales montrent que la peinture photocatalytique agit sur certains polluants de l'air intérieur, mais émet souvent des sous-produits de réaction.

Par exemple, une peinture contenant 7 % de TiO_2 ayant une très bonne capacité à dégrader le m-xylène, émet également du méthanol, du formaldéhyde, de l'acétone et de l'acide formique lors d'une exposition à une lumière UV-VIS (Gandolfo *et al.* 2016). Les auteurs soulignent que ces composés sont probablement issus de la dégradation des liants organiques de la peinture. Avec une peinture similaire, des essais sur la dégradation du NO_2 ont montré la formation de NO et HONO, ce dernier pouvant former des radicaux OH par photolyse (Gandolfo *et al.* 2015). Une modélisation conduite dans cette étude a montré qu'une peinture contenant 7 % de TiO_2 pouvait conduire à une concentration de 5,6 ppb de HONO dans une pièce de vie.

Les études expérimentales décrites ci-dessous ont été conduites sur des matériaux commercialisés ou des peintures dont la composition est proche de peintures commercialisées. Elles illustrent la capacité de ces matériaux photocatalytiques à dégrader plus ou moins efficacement les polluants de l'air intérieur, mais également leur capacité à émettre des COV.

a) Auvinen et Wirtanen (2008)

Auvinen et Wirtanen (2008) ont testé, dans des chambres d'essais (27 dm^3), 6 peintures photocatalytiques dont 3 étaient disponibles dans le commerce, avec différents liants (siloxane polyorganique, silice sol-gel, chaux, composés organiques), ainsi qu'une peinture du commerce non photocatalytique, afin d'étudier :

- la dégradation photocatalytique du liant,
- la décomposition et l'élimination photocatalytique du formaldéhyde,
- la décomposition et l'élimination photocatalytique d'un mélange de 5 COV (n-heptane, toluène, α -pinène, 1-hexanol et nonanal) présent dans l'air intérieur.

Les auteurs concluent que les composés organiques des peintures, comme les liants et additifs, peuvent être décomposés par la photocatalyse et cette auto dégradation peut émettre des quantités non négligeables de composés organiques comme des cétones et des aldéhydes. Il est donc important que le liant soit suffisamment stable pour supporter des radicaux très actifs. L'élimination du formaldéhyde n'a pas pu être observée, la concentration a même augmenté pour certaines peintures testées. Des produits secondaires comme des cétones et des aldéhydes sont formés, particulièrement sous la lumière UVA. Les résultats des essais sur des peintures fraîches et vieilles sont similaires, avec des concentrations légèrement plus élevées pour certaines peintures vieilles. Cela peut être dû à la disparition de certains composés de la peinture qui entrainerait une meilleure accessibilité des sites photocatalytiques. Le support de la peinture (verre, plastique ou plâtre) n'a pas d'incidence sur les résultats observés.

Pour les peintures les moins actives, il n'a pas été observé d'élimination des COV injectés dans les chambres d'essais. Pour les peintures les plus actives, une dégradation du nonanal et du 1-hexanone a été observée, mais des produits secondaires comme le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et l'acétone ont également été observés.

b) Bartolomei et al. (2016)

La plupart des essais sont effectués sous lumière UV, alors que dans des conditions réelles d'utilisation les matériaux photocatalytiques sont soumis à la lumière visible. Bartolomei *et al.* (2016) ont évalué l'efficacité de différents matériaux avec des propriétés photocatalytiques, disponibles sur le marché français, soumis à de la lumière visible dans une chambre d'essai en acier inoxydable de 360 L. Les matériaux testés étaient une peinture, deux vernis pour le bois, trois enduits muraux (dont un non photocatalytique - sans TiO_2 - mais de même composition que les deux autres) et des carreaux de céramique. Les essais ont été conduits sur les matériaux neufs (21 jours après l'application sur des plaques d'acier), mais également après une exposition à 100 ppb d'ozone pendant 14 jours ou après une exposition à des UV-A pendant 14 jours pour simuler un vieillissement des matériaux.

L'efficacité a été testée sur deux mélanges :

- formaldéhyde, toluène et limonène ($15\text{-}50 \mu\text{g.m}^{-3}$),
- toluène et limonène ($15\text{-}50 \mu\text{g.m}^{-3}$) (afin de mieux mettre en évidence la formation de formaldéhyde).

Un essai de référence a été conduit dans le noir en présence du mélange des trois polluants. Les enduits montrent un taux de conversion du formaldéhyde (fraction du formaldéhyde qui a été éliminé) entre 37 et 78 %, y compris pour l'enduit sans TiO_2 . Les auteurs suggèrent que cette adsorption est due à la porosité du matériau. Les taux de conversion du formaldéhyde pour les autres matériaux et ceux du toluène et limonène pour tous les matériaux sont de l'ordre de 10 % ou inférieur, sauf pour les carreaux de céramique qui n'ont montré aucune activité.

Concernant les matériaux neufs, la peinture produit plus de formaldéhyde qu'elle n'en élimine, ce qui conduit à un taux de conversion négatif et à des taux de conversion de 8-15 % pour le toluène et le limonène. Les enduits ont des taux de conversion du formaldéhyde d'environ 45 % et d'environ 10 % pour les deux autres COV. Les vernis n'ont aucun effet sur le formaldéhyde et des taux de conversion de 10-20 % pour le toluène et le limonène sont observés. Enfin, les carreaux de céramique n'ont aucun effet sur le toluène et limonène, et produisent un peu de formaldéhyde.

La formation de sous-produits est observée : formaldéhyde (peinture et céramique), acétaldéhyde, 2-éthyl hexanol (essentiellement pour l'enduit) et benzaldéhyde.

Les essais conduits sans formaldéhyde ont des résultats similaires, ce qui peut traduire une absence de compétitivité entre le formaldéhyde et les deux autres COV.

Les vieillissements par l'ozone et l'UV-A montrent une légère réduction des taux de conversion, et une diminution des sous-produits formés. L'activité photocatalytique des matériaux a donc tendance à diminuer avec le temps.

Les propriétés d'épuration de l'air de ces matériaux de construction sur ces trois COV typiques de l'air intérieur varient de 0 à 45 % sous de la lumière visible. Ces faibles résultats montrent que la lumière du jour pourrait ne pas être suffisante pour initier une excitation photocatalytique totale. De plus des sous-produits sont observés, ce qui traduit un procédé photocatalytique incomplet.

c) Geiss et al. (2012)

Geiss *et al.* (2012) ont étudié la formation de composés carbonylés d'une peinture photocatalytique non commercialisée, mais représentative d'une peinture typique. Quatre panneaux de gypse d' 1 m^2 peints ont été placés dans une chambre expérimentale de 30 m^3 et irradiés pendant 14 jours. Un prélèvement a été fait dans le noir, puis à intervalles réguliers pendant l'irradiation. Les composés carbonylés principalement émis, jusqu'à des concentrations de $80 \mu\text{g.m}^{-3}$, étaient le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le propanal et l'acétone. De l'hexanal, de l'heptanal et de l'octanal ont également été mesurés, mais à des concentrations inférieures à $1 \mu\text{g.m}^{-3}$. Les émissions des composés carbonylés sont maximales peu de temps après le début de l'irradiation, et décroissent dans le temps. Par exemple, la concentration en formaldéhyde

augmente rapidement jusqu'à $80 \mu\text{g.m}^{-3}$, puis décroît jusqu'à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ à 7 jours et $15 \mu\text{g.m}^{-3}$ à 14 jours. L'effet du vieillissement de la peinture a été évalué en irradiant de nouveau les panneaux, toujours pendant 14 jours, 4 et 5 mois après la première irradiation. Les résultats sont similaires pour tous les carbonyles avec une même courbe des émissions que pour la première période d'irradiation : une émission forte au début de l'irradiation, puis une décroissance pendant les 14 jours. Si les émissions sont moins fortes à 4 et 5 mois, la concentration émise lors du début de l'irradiation est plus élevée que celle observée à la fin de la période précédente. Ainsi pour le formaldéhyde, après la première période d'irradiation la concentration est de $15 \mu\text{g.m}^{-3}$, et d'environ $55 \mu\text{g.m}^{-3}$ au début de l'irradiation 4 mois après la première irradiation.

L'étude a également recherché l'influence du TiO_2 sur les émissions de carbonyles, en irradiant pendant 5 heures la même peinture, mais sans TiO_2 .

Pour la peinture, en l'absence de TiO_2 , la peinture n'émet que du formaldéhyde et de l'acétaldéhyde, en très faibles quantités pour ce dernier, mais dans des quantités identiques pour le formaldéhyde. La peinture avec TiO_2 émet également de l'acétone, du propanal, du butanal et de faibles quantités d'hexanal et décanal. Contrairement aux essais sur 14 jours, l'acétaldéhyde est le composé dont l'émission est la plus importante. Ces résultats démontrent que le TiO_2 , irradié, contribue à la formation de carbonyles, mais qu'il n'a pas d'influence sur la formation/émission de formaldéhyde.

Les auteurs concluent que le développement de peintures photocatalytiques pouvant être activées par des UV et la lumière visible doit être optimisé pour limiter les émissions de substances potentiellement dangereuses, notamment en améliorant la stabilité de ses constituants.

6.2.4.1.3 Conclusions

Le principe des matériaux de construction et de décoration photocatalytiques est intéressant car ces matériaux ne consomment pas d'énergie, sont silencieux et ne nécessitent pas d'entretien. De plus, pour les peintures, qui sont les produits les plus courants, l'étude de marché a souligné que dans le cadre de travaux de rénovation effectués par un professionnel, le surcoût du choix d'une peinture photocatalytique vs une peinture classique est faible. Toutefois, la bibliographie, portant essentiellement sur les peintures, montre que leur utilisation peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'air.

Dans leur étude de perception de la qualité de l'air, Kolarik et Toftum (2012) concluent qu'en présence de matériaux de construction et de décoration comme le linoléum ou des panneaux de particules, l'activation de la peinture photocatalytique entraîne une diminution de l'acceptabilité de la qualité de l'air ce qui est vraisemblablement dû à l'émission de produits secondaires. Ces produits secondaires seraient émis suite à la dégradation incomplète des polluants, mais également suite à l'auto-dégradation de la peinture. En effet, certains composés de la peinture sont organiques et donc susceptibles de réagir avec le photocatalyseur activé. Des recherches sont donc nécessaires pour améliorer la stabilité des constituants de ces matériaux.

Pour être des produits viables, les matériaux photocatalytiques doivent démontrer une activité photocatalytique durable, en accord avec la durée de vie habituelle de ces matériaux. Trois des études décrites ont évalué l'action du vieillissement des peintures. Les émissions de composés carbonyles uniquement dus à l'auto-dégradation de la peinture diminuent (Geiss *et al.* 2012). Lorsque la peinture est soumise à des COV, les résultats sont contradictoires, une diminution du taux de conversion et des sous-produits formés, qui traduirait une diminution de l'activité photocatalytique est observée dans l'étude de Bartolomei *et al.* (2016), alors qu'une légère augmentation des émissions, qui seraient dues à une meilleure accessibilité des sites photocatalytiques, est observée dans l'étude de Auvinen et Wirtanen (2008). Le procédé de vieillissement et les COV testés différaient dans les deux études.

Enfin, les photocatalyseurs doivent être améliorés pour être plus efficaces à la lumière du jour qui est moins puissante que la lumière UV souvent utilisée dans les essais expérimentaux.

6.2.4.1 Dispositifs actifs – épurateurs autonomes

D'après l'étude de marché, 17 % des épurateurs autonomes et 18 % des climatiseurs recensés utilisent le principe de la photocatalyse pour épurer l'air. Dans ces dispositifs, la photocatalyse est souvent couplée à une ou plusieurs autres technologies, souvent la filtration (57 %) et/ou l'ionisation (64 %). Elle n'est utilisée seule que dans 4 % des dispositifs.

6.2.4.1.1 *Effets sur la perception de la qualité de l'air*

L'équipe de Kolarik a réalisé deux études sur la perception de la qualité de l'air, suite à l'utilisation de deux prototypes d'épurateurs photocatalytiques. Les protocoles et résultats sont résumés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Perception de la qualité de l'air suite à l'utilisation de prototypes d'épurateurs photocatalytiques (Kolarik *et al.* 2010, Kolarik et Wargocki 2010)

	Kolarik <i>et al.</i> (2010)	Kolarik et Wargocki (2010)
Purificateur d'air	<p>Prototype non commercialisé, avec du TiO₂, des lampes UV, et en amont, un filtre MERV 10 et deux plaques en acier perforées (pour protéger le photocatalyseur et les lampes de la poussière).</p> <p>Utilisation d'un épurateur « factice » avec uniquement la ventilation</p>	<p>L'épurateur est conçu pour être utilisé dans un conduit de ventilation. Il n'est pas précisé s'il s'agit d'un dispositif commercialisé. Le catalyseur est le du TiO₂ et les lampes UV.</p> <p>Utilisation d'un épurateur « factice » avec uniquement la ventilation</p>
Pièce expérimentale	<p>Bureau de 108 m³, divisé en deux parties par une cloison.</p> <p>D'un côté 10 postes de travail et les analyseurs d'air, de l'autre, le photocatalyseur, les sources d'émission de polluants et le système de ventilation ainsi que des ventilateurs afin d'homogénéiser l'air dans la pièce.</p>	<p>3 pièces</p> <p>36 m², 108 m³</p> <p>2 de 13 m², 40 m³</p> <p>Pollution de fond faible (revêtement de sol et peintures à faibles émissions)</p> <p>Séparées en deux par une cloison de 2 m de haut</p> <p>Disposition : d'un côté l'évaluation de l'air, de l'autre la mise en conditions.</p>
Sources de polluants	<p>50 m² d'une moquette âgée de 20 ans (issue d'un bureau existant)</p> <p>12,5 m² d'un linoléum âgé de 7 ans</p> <p>5 m² de panneaux de particules âgés de 5 ans</p>	<p>i : 50 m² d'une moquette âgée de 20 ans (issue d'un bureau existant), 12,5 m² d'un linoléum âgé de 6 ans et 5 m² de panneaux de particules âgés de 3 ans</p> <p>ii : 2 écrans cathodiques neufs connectés à un PC, branchés pendant 5 h avant le premier essai et laissés en fonctionnement pendant les essais</p> <p>iii : 7 filtres ayant préalablement été utilisés dans un système de ventilation pendant 1 an</p> <p>iv : Mélange de sources précitées : matériaux de construction (15 m² de moquette, 3,8 m² de linoléum et 1,5 m² de panneaux de particules. + un écran et un PC + un filtre usagé)</p> <p>v : 7 personnes – sources de bioeffluents</p>

	Kolarik et al. (2010)	Kolarik et Wargocki (2010)
Taux de renouvellement d'air (h⁻¹)	0,6 ; 2,5 ; 6.	Varie en fonction des conditions : Pièce de 108 m³ 0,6 ; 2 et 6 en présence des matériaux de construction et du mélange de sources Pièces de 40 m³ 2 ; 4 et 7 pour le filtre usagé 1 et 2 pour les bioeffluents 1 ; 3 et 7 pour les écrans et l'ordinateur.
Conditions expérimentales	Tests conduits aux 3 taux de renouvellement d'air 1 – l'épurateur éteint avec les sources de polluants 2 – l'épurateur en marche avec les sources de polluants 3 – l'épurateur en marche sans les sources de polluants 4 - l'épurateur éteint sans les sources de polluants	Epurateur éteint et allumé en présence de chaque source/mélange de polluants décrit ci-dessus, aux différents taux de renouvellement d'air.
Panel	2 groupes (le premier groupe n'étant pas disponible pour les 2 essais) 38 sujets de 19 à 45 ans (moyenne : 24,3 ans) (24 hommes et 14 femmes) avec les sources de pollution présentes 39 sujets de 21 à 70 ans (moyenne : 36,7 ans) (23 hommes et 16 femmes) sans les sources de polluants	50 sujets, recrutés au sein de l'Université Technique du Danemark (34 hommes et 16 femmes), dont 6 fumeurs, 9 allergiques, 3 sujets au rhume des foins, et 34 se déclarant comme sensibles à la mauvaise qualité de l'air.
Etude sensorielle	Evaluation de l'acceptabilité de la qualité de l'air, de l'intensité de l'odeur et de la fraîcheur de l'air. Evaluation faite au moment de l'entrée dans la pièce	Evaluation de l'acceptabilité de la qualité de l'air, de l'intensité de l'odeur et de la fraîcheur de l'air. Evaluation faite au moment de l'entrée dans la pièce
Mesures des polluants	Analyse chromatographique (GC/MS et HPLC/UV) de 50 COV cibles (choisis en fonction de précédentes mesures avec des polluants similaires) Analyse spectrométrique de masse (uniquement à 06 h ⁻¹)	Pas de mesures de polluants.

	Kolarik et al. (2010)	Kolarik et Wargocki (2010)
Résultats	<p>Etude sensorielle :</p> <p>La qualité de l'air a été perçue comme améliorée en présence des matériaux de construction avec le fonctionnement de l'épurateur, mais statistiquement significatif uniquement pour un renouvellement de l'air de 2,5 et 0,6 h⁻¹. Même résultat pour la fraîcheur de l'air et l'odeur.</p> <p>Même résultat sans la présence des sources de polluants à 0,6 h⁻¹.</p> <p>Chromatographie :</p> <p>18 COV sur 50 au-dessus de la limite de détection, pour au moins un des essais.</p> <p>A 0,6 h⁻¹, la mise en marche de l'épurateur a entraîné la diminution de la concentration de la majorité des polluants.</p> <p>Ce n'était pas le cas aux taux de renouvellement supérieurs, où très peu de polluants étaient au-dessus de la limite de détection.</p> <p>PTR-MS (spectrométrie de masse – réaction par transfert de proton) :</p> <p>Montre que beaucoup de composés sont présents au-dessus de la limite de détection. L'utilisation de l'épurateur permet de diminuer ces concentrations que les sources soient présentes ou non.</p> <p>A noter : en présence des sources, par analyse chromatographique, l'utilisation du réacteur photocatalytique a augmenté la concentration de certains polluants : acide acétique, acétone, 2-butanone (mêmes résultats sans les sources mais à des concentrations plus faibles). Résultats reproductibles à différents taux de renouvellement d'air → possible oxydation incomplète</p> <p>La PTR-MS n'a pas montré ces mêmes augmentations, mais une augmentation de quelques ppb pendant la première heure de fonctionnement : formaldéhyde, acétaldéhyde, acétone</p>	<p>Perception de la qualité de l'air</p> <p>En présence des bioeffluents, le fonctionnement de l'épurateur a eu un impact négatif sur la perception de la qualité de l'air (augmentation significative du pourcentage de sujets insatisfaits)</p> <p>En présence des matériaux de construction, des filtres usagés (uniquement au faible taux de ventilation) et du mélange de polluants, le fonctionnement de l'épurateur a eu un impact négatif sur la perception de la qualité de l'air (augmentation significative du pourcentage de sujets insatisfaits)</p> <p>Odeurs</p> <p>Faible taux de ventilation : l'intensité des odeurs est significativement réduite en présence de matériaux de construction, mélange de polluants, filtres usagers et écrans + PC. L'intensité de l'odeur a significativement augmenté en présence des bioeffluents.</p> <p>Taux de ventilation moyen : même résultat sauf pour les écrans + PC.</p> <p>Fraîcheur de l'air</p> <p>Améliorée : en présence des matériaux de construction et des filtres usagés, mais de manière non significative pour le taux de ventilation moyen.</p> <p>Détériorée : en présence des bioeffluents aux taux de ventilation faible et moyen.</p>

D'après ces deux études, la perception de la qualité de l'air, l'intensité des odeurs et la fraîcheur de l'air peuvent être améliorées de manière significative avec des taux de ventilation faible ou moyen, en présence de matériaux de construction, filtres usagés et matériel informatique. Mais en présence de bioeffluents la qualité de l'air perçue est détériorée, probablement en raison de l'oxydation incomplète des alcools, principaux composés des bioeffluents d'après Kolarik et Wargocki (2010). Dans leur étude, Kolarik *et al.* (2010) ont réalisé en plus de l'étude sensorielle, des prélèvements d'air qui montrent que de nombreux polluants sont présents. Le fonctionnement de l'épurateur permet de diminuer certains polluants, au taux de renouvellement d'air de 0,6 h⁻¹. Certains polluants comme l'acide acétique, la 2-butanone et l'acétone ont vu leur concentration augmenter, aux différents taux de renouvellement de l'air.

Ces résultats confirment la nécessité de réaliser des mesures des polluants lors des études de perception, afin de rechercher la présence de polluants secondaires et l'impact réel de l'épurateur sur la qualité de l'air. En effet une amélioration de la perception de la qualité de l'air, notamment en termes de fraîcheur et odeur ne signifie pas que la qualité de l'air est réellement améliorée.

6.2.4.1.2 Effets sur les polluants organiques

Seules deux études sur des épurateurs photocatalytiques commercialisés utilisés en conditions réelles d'utilisation ont pu être identifiées *via* la recherche bibliographique. Une des études concerne l'utilisation d'un épurateur dans un pressing, face à une pollution spécifique, le perchloroéthylène. Une troisième étude comparant l'efficacité de dispositifs commercialisés en laboratoire, suivant la norme XP B44-013 a également été retenue.

Plusieurs revues de la littérature sur la photocatalyse ont été recensées, celle de Mo *et al.* (2009) synthétise les produits secondaires émis lors de la dégradation de COV. Cette revue a identifié 1906 articles, publiés avant mars 2008, dont 168 ont été retenus. Ces intermédiaires, identifiés lors d'études expérimentales, sont repris dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Produits intermédiaires issus de la photocatalyse des COV recensés dans la revue de Mo *et al.* (2009)

Polluant initial	Sous-produits possibles
Méthanol	Formaldéhyde (gaz phase reaction) Formaldéhyde, méthynal, méhtyl formate
Ethanol	Méthanol, acetaldéhyde, formaldéhyde, acide acétique, acide formique
1-butanol	Butanal, acide butaoïque 1-propanol, propanal, éthanol, acétaldéhyde
2-propanol (et autres alcool « non-normal »)	Acétone
Formaldéhyde	Acide formique, monoxyde de carbone
Autres aldéhydes	Acides correspondants, aldéhydes à chaînes plus courtes, dioxyde de carbone et eau
Acétones	Alkylperoxydes, acétaldéhyde, méthyl formate, acide formique, méthyl éthyl cétone
Toluène	Benzaldéhyde, alcool benzylique, crésol, acide benzoïque, phénol, benzène, acide oxalique, acide acétique, acide formique, acide pyruvique

Polluant initial	Sous-produits possibles
Benzène	Phénol, hydroquinone, 1,4-benzoquinone, 2-hexanol, 2-méthylcrotonaldéhyde, 4-hydroxyl-3-méthyl-2-butanone, acétate d'éthyl, (3-méthyl-oxiran-2-yl)-méthanol, hydroxytoluène butylé, 2,6-bis(1,1-diméthyl-éthyl)-4,4-diméthylcyclohe, 2,5-cyclohexadiène-1,4,dione,2,6-bis(1,1-dim)

En fonction des conditions de mise en œuvre, ces intermédiaires réactionnels peuvent être émis par les systèmes photocatalytiques ou encore désactiver le catalyseur, comme l'acide benzoïque.

a) *Costarramone et al. (2015)*

Costarramone *et al.* (2015) ont comparé les performances de neuf épurateurs photocatalytiques commercialisés suivant la norme XP B44-013, dans une chambre d'essai de 1,2 m³.

Les résultats sont résumés dans le Tableau 13. Les COV testés sont l'acétaldéhyde, l'acétone, le N-heptane et le toluène à des concentrations de 250 ppbv et 1000 ppbv pour chaque composé.

Tableau 13 : résumé des tests contrôles et photocatalytiques des neufs épurateurs (Costarramone et al. 2015)

Epurateurs	Source d'irradiation	Photocatalyse seule	Test contrôle sans COV		Tests de photocatalyse avec les 4 COV (24 h maximum)		
			COV émis	CO ₂ produit	Elimination de COV	Minéralisation	Sous-produit final
D0	UVC	Oui	-	-	>99%	>99%	-
D1	UVA	Oui	-	+	>99%	>99%	-
D2	UVA	Oui	-	+	>99%	>99%	-
D3	UVA	Oui	-	+	>99%	>99%	-
D4	UVA	Oui	-	+	>99%	>99%	-
D5	UVC	Non + ionisation et filtration	+ ^a	-	<20% ^d	<5%	HCHO
D6	UVC	Non + filtration par charbon actif	-	+	>99%	e	-
D7	UVA	Non + filtration par charbon actif	+ ^b	-	<30% ^d	40%	HCOH
D8	Non spécifié	Non + ionisation et filtration	+ ^c	-	48-99% ^d	<5%	HCHO

a: acétaldéhyde, acétone, formaldéhyde, éthyl acétate, benzène, butyl formate, toluène, o- et p-xylène, éthylhexanol, avec des alcanes de C12 à C14.

b: acétaldéhyde et de faibles concentrations de formaldéhyde, acétone et toluène.

c: acétaldéhyde, acétone, formaldéhyde, éthanol, t-butanol et butanal.

d: en fonction des COV

e : non déterminé

Après 24 heures, les COV émis, par trois des appareils, dans la phase contrôle (sans sources de COV) sont principalement l'acétaldéhyde (<260 ppbV), l'acétone (<160 ppbV) et le formaldéhyde (<42 ppbV). Ce résultat implique que des composants ne sont pas stables lorsque l'épurateur est allumé. Les émissions de COV peuvent provenir soit du matériau photocatalytique, soit des composés irradiés par les lampes UV-C ou UV-A. Pendant cette phase de contrôle cinq épurateurs ont produits du CO₂, ce qui démontre une activité photocatalytique, probablement sur des COV émis par les dispositifs. A noter que les 3 épurateurs qui ont émis des COV, n'ont pas produit de CO₂, ce qui pourrait traduire une minéralisation incomplète.

Pendant le test de photocatalyse, une diminution de la concentration en COV a été observée pour presque tous les épurateurs. Les CADR ont été calculés.

Les six épurateurs pour laquelle la minéralisation est supérieure à 99 % après 5 heures de fonctionnement, ne montrent pas de sous-produits. A noter que du formaldéhyde a été observé pendant les 30 premières minutes. Les 3 autres épurateurs n'ont pas ou peu de capacité à minéraliser les COV. De plus ils contiennent des matériaux qui émettent des COV et notamment du formaldéhyde en présence des 4 COV testés. Ils ne devraient donc pas être utilisés comme purificateurs d'air intérieur.

Le Tableau 14 montre que les CADR ne sont pas corrélés au débit des épurateurs et que le changement de catalyseur, par un même catalyseur, mais d'un lot différent ne donnait pas les mêmes résultats.

L'épurateur D3 a subi des tests de vieillissement en restant allumé dans le laboratoire pendant plusieurs semaines. Il a été testé plusieurs fois pendant cette période. Si les CADR diminuent avec le temps, la minéralisation reste complète, à l'issue des 4 mois de vieillissement. La baisse du CADR peut être due à une baisse de l'efficacité de la lampe et/ou du catalyseur.

L'étude a également cherché à mesurer les émissions de nanoparticules, qui n'ont été observées avec aucun des épurateurs.

Les auteurs concluent que des données complémentaires sur l'efficacité et la sécurité de ces épurateurs dans un volume plus représentatif de conditions réelles, ventilé et en présence d'autres polluants seraient nécessaires et qu'il y a un besoin urgent de tests appropriés et de certification pour assurer la sécurité des consommateurs.

Pour compléter cette dernière conclusion, la norme XP B44-013 est conçue pour mesurer l'efficacité d'un épurateur en milieu confiné. L'efficacité mesurée dans ces conditions est plus favorable que dans des conditions réelles d'utilisation dans un grand volume, car elle favorise les multiples passages des polluants dans l'épurateur, et donc leur minéralisation complète.

Tableau 14 : CADR pour les COV aux concentrations initiales de 1000 et 250 ppbV de chaque polluant (acétaldéhyde, toluène, acétone, n-heptane et COV totaux) (Costarramone *et al.* 2015)

Dispositif			CADR (m ³ .h ⁻¹)									
Débit maximal (m ³ .h ⁻¹)	V _{dispositif} / V _{chambre}		Acétaldéhyde	Toluène	Acétone	n- heptane	COV totaux	Acétaldéhyde	Toluène	Acétone	n- heptane	COV totaux
			1000 ppbV chaque					4000 ppbV	250 ppbV chaque			
D0	30	0,011	9,82	5,96	3,42	2,09	3,64	22,04	10,27	6,95	4,70	7,23
D1	20	0,005	2,49	2,44	1,68	1,33	1,76	3,20	3,08	2,37	2,04	2,64
D2	50	0,015	13,73	5,90	3,55	14,05	6,19	19,80	10,94	7,34	20,15	12,67
D2 ^a			22,10	11,01	4,79	13,77	10,21	–	–	–	–	–
D3	120	0,008	4,06	1,24	1,13	0,49	0,84	7,81	2,35	2,36	1,30	1,80
D3 ^a			2,45	0,76	0,68	0,25	0,51	12,70	2,60	2,33	1,20	1,90
D4	250	0,061	9,1	4,39	2,79	2,71	3,65	ND	4,86	3,76	4,59	5,01
D6	160	0,033	12,80	24,50	23,20	29,40	23,90	ND	ND	ND	ND	34,40

ND : non déterminé $V_{\text{dispositif}} / V_{\text{chambre}}$: ratio du volume du dispositif sur le volume de la chambre

a : essai avec un nouveau média photocatalytique du même fabricant, mais d'un autre lot

b) Costarramone et al. 2016

Le même auteur a participé à une autre étude sur quatre épurateurs suivant le même protocole, présentée à l'occasion de la conférence Indoor Air de 2016 (Costarramone *et al.* 2016). Les deux épurateurs les plus efficaces ont également été testés dans une plateforme expérimentale de 40 m³ dans des conditions réelles d'utilisation. Cette plateforme était meublée et le sol en bois. Outre le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et l'acétone, du toluène, du limonène, de l'hexanal, du pentanal, de l'octanal, du nonanal, de l' α - et β - pinène, du 3-carene et du 1- pentanol ont été détectés. L' α -pinène, l'hexanal et l'acétone ont été retrouvés dans les concentrations les plus significatives.

La comparaison des résultats entre les essais dans la chambre d'essai et en conditions « réelles » montre une bonne corrélation. La concentration des COV les plus lourds diminue quelques jours après la mise en fonctionnement des épurateurs. La formation de COV légers (acétone, acétaldéhyde et formaldéhyde) a été observée, probablement liée à la minéralisation continue mais incomplète des COV plus lourds. Les concentrations sont stables ou augmentent légèrement, mais restent en dessous de la valeur guide court terme de l'OMS pour le formaldéhyde (100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Les auteurs soulignent que des modifications des paramètres tels que la température, l'humidité relative, la ventilation modifieront probablement les résultats.

Comme dans l'étude précédente aucune émission de nanoparticule n'a été observée.

c) Tokarek et al. (2011)

Tokarek *et al.* (2011) décrivent une étude sur cinq appareils autonomes disponibles dans le commerce, dans une gamme de prix allant de 150 à 1 600 €. L'objectif était dans une première phase de tester les émissions d'ozone et de NO_x en l'absence de polluant à traiter, puis dans une seconde phase, d'étudier l'efficacité chimique et particulaire de l'appareil le moins émissif, avant et après vieillissement. Les essais sur les cinq appareils ont été conduits dans une chambre d'essais de 1 m³, avec un taux de renouvellement d'air de 1 vol.h⁻¹, une humidité relative de 50 % à 23 °C. L'air exempt de polluant est obtenu par filtration particulaire et charbon actif. Les concentrations en NO_x et ozone étaient mesurées en continue en sortie de la chambre d'essais.

Un deuxième banc d'essai, d'un volume de 713 L, a été conçu pour mesurer l'efficacité particulaire. La granulométrie de l'aérosol généré est mesurée en amont et en aval du système.

Les principes de fonctionnement et les résultats de cette première phase sont décrits dans le Tableau 15. Les émissions d'ozone et de NO_x, principalement du NO₂, sont mesurées pour 3 épurateurs reposant sur des principes d'épuration différents sur les cinq testés. Elles débutent dès la mise en fonctionnement de l'appareil et se terminent à son arrêt. Les émissions sont plus importantes au débit d'air minimum.

Tableau 15 : Principales caractéristiques des appareils testés telles que fournies par les fabricants et résultats des tests d'émissions d'ozone et de NO_x. (Tokarek et al. 2011)

	Epurateur 1	Epurateur 2	Epurateur 3	Epurateur 4	Epurateur 5
Système de filtration de particules	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Système de traitement de l'air	Catalyse Ionisation négative	Photocatalyse Ionisation négative	Photocatalyse Ionisation négative	Photocatalyse	Photocatalyse
Production d'ozone	Oui	Non	Oui	Non	Non
Production de NO _x	Oui	Non	Non	Oui	Non

La publication n'évoque pas d'hypothèses sur les raisons des différences de production d'ozone et de NO_x pour des appareils fonctionnant sur le même principe et ne précise pas pourquoi l'épurateur n°2 a été choisi et non le n°5 pour la conduite de la seconde phase de l'étude.

Dans la deuxième phase, l'épurateur 2, fonctionnant sur les principes de la photocatalyse et de l'ionisation négative, a été soumis à un mélange de formaldéhyde, toluène, limonène et de NO_x. Les concentrations choisies étaient proches des concentrations moyennes observées lors de la Campagne nationale logements (CNL) réalisée par l'OQAI en 2006, à l'exception des NO_x qui n'avaient pas été mesurés lors de cette campagne, et pour lesquels un compromis entre les valeurs moyennes relevées dans littérature a été retenu (Tableau 16). Les concentrations sont mesurées en sortie de la chambre d'essai avec des prélèvements d'une heure :

- Le premier avec l'épurateur à l'arrêt afin de vérifier le niveau de polluants généré,
- Les quatre suivants avec l'épurateur en fonctionnement,
- Le dernier l'épurateur à l'arrêt à fin de vérifier de nouveau la génération de polluants.

Les mesures d'efficacité particulaire ont été réalisées à deux vitesses, 220 m³.h⁻¹ (vitesse 2) et 440 m³.h⁻¹ (vitesse 4).

Afin d'étudier le vieillissement de l'appareil, ce dernier a fonctionné en continu pendant 1 mois dans la maison MARIA du CSTB. Une source d'émission de limonène a été introduite dans la chambre d'essai au milieu de la campagne de mesures, ainsi, plusieurs morceaux de lambris en pin ont été disposés dans la pièce d'étude entre les semaines 2 et 3.

Les résultats des essais sont résumés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Synthèse des résultats des essais de la phase 2 pour 1 épurateur d'air autonome en terme d'évolution des concentrations en polluants (d'après Tokarek *et al.* (2011)).

Polluants suivis	Concentrations générées (µg.m ⁻³)	Résultats
Formaldéhyde	25	<p><u>A un débit de 220 m³.h⁻¹</u></p> <p>Augmentation significative de la concentration dès la mise en marche de l'appareil.</p> <p>Supérieure à 150 µg.m⁻³ pour l'appareil neuf</p> <p>De l'ordre de 50 à 75 µg.m⁻³ avec l'appareil vieilli.</p>
Toluène	30	<p><u>A un débit de 220 m³.h⁻¹</u></p> <p>Augmentation de l'ordre de 10-20%</p> <p>→ Peu significatif car du même ordre de grandeur que l'incertitude associée</p> <p>→ Résultats identiques pour le système neuf et vieilli</p> <p><u>Au débit maximal</u></p> <p>Concentrations très nettement supérieures</p> <p>→ Emissions vraisemblablement intrinsèques par le système</p> <p>→ Résultats identiques pour le système neuf et vieilli</p>

Polluants suivis	Concentrations générées ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Résultats
Limonène	20	<p style="text-align: center;"><u>A un débit de $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$</u></p> <p>Diminution de 90 % de la concentration pour l'appareil neuf.</p> <p>Diminution de 50 % pour l'appareil vieilli.</p>
Monoxyde d'azote	30	<p style="text-align: center;"><u>A un débit de $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$</u></p> <p>Dès le début de fonctionnement de l'appareil, il est observé une diminution rapide de la concentration en NO, et une augmentation concomitante de la concentration en NO₂. Le bilan global sur la concentration de NO_x est quasiment nul.</p> <p>→ résultats identiques pour le système neuf et vieilli</p>
Particules de diamètre centré sur 0,5 μm	Non précisée	<p style="text-align: center;"><u>A un débit de $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$</u></p> <p>Pour l'appareil neuf, l'efficacité particulaire pour les particules de 0,5 μm de diamètre est de 60 %</p> <p style="text-align: center;"><u>A un débit de $440 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$</u></p> <p>Pour l'appareil neuf, l'efficacité particulaire pour les particules de 0,5 μm de diamètre est de 77,5 %</p>

En complément des mesures d'évolution de la concentration des polluants injectés, des mesures d'autres COV et aldéhydes ont été faites lors de l'utilisation de l'appareil vieilli. Celles-ci montrent que l'appareil émet du formaldéhyde et d'autres aldéhydes (benzaldéhyde, pentanal, octanal), du toluène, du styrène, du xylène, et différents alcanes (dont décane et undécane) lors de son fonctionnement et du formaldéhyde et des traces de toluène, éthylbenzène, styrène, xylène, benzaldéhyde lorsqu'il est arrêté.

Cette étude sur un nombre restreint d'appareils est insuffisante pour être représentative. Néanmoins, parmi les cinq épurateurs testés, trois émettent de l'ozone et/ou des NO_x, en l'absence de polluant à traiter.

L'efficacité particulaire, de 60 à 78 %, est, d'après l'auteur, assez bonne en comparaison avec des systèmes équivalents ; elle semble augmenter avec le débit. Concernant l'efficacité sur les polluants gazeux, elle est plus discutable. Ainsi, pour les NO_x et le toluène, le bilan épuratoire est neutre, avec toutefois une augmentation de la concentration de NO₂ et une diminution de la concentration de NO. Pour le limonène, l'abattement est de 90 % pour le système neuf, mais il diminue quasiment de moitié pour un appareil ayant fonctionné en continu pendant un mois. Concernant le formaldéhyde, la concentration augmente dès la mise en marche de l'appareil, jusqu'à plus de $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour l'appareil neuf et jusqu'à $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour l'appareil vieilli. L'auteur a réalisé un calcul théorique dans l'hypothèse où l'appareil serait mis en fonctionnement dans une pièce de 30 m^3 avec un taux de renouvellement d'air horaire de 0,5. L'émission d'une concentration de formaldéhyde de $70 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ (émission mesurée pour un appareil vieilli) entraînerait une augmentation de la concentration de $4,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette augmentation de la concentration en formaldéhyde pourrait être due à une émission des matériaux constitutifs et/ou la conversion du limonène.

D'après l'auteur, la diminution de l'abattement du limonène et de l'émission du formaldéhyde lors de l'utilisation de l'appareil vieilli, pourrait être dues à la dégradation des performances de

l'appareil et/ou une modification des phénomènes de réactivité liée à un ratio NO/NO₂ différent dans le mélange à traiter dans les essais avant et après vieillissement.

Enfin, il est à noter, qu'en absence de polluant, l'appareil vieilli, qu'il soit en fonctionnement ou non, entraîne l'émission de COV et d'aldéhydes. Cet essai n'a pas été conduit sur l'appareil neuf.

d) Gérardin et al. (2010)

Des systèmes photocatalytiques peuvent également être utilisés en milieu professionnel contre une pollution spécifique ; par exemple, dans des pressings pour éliminer le perchloroéthylène. L'étude de Gérardin *et al.* (2010) a identifié dans la littérature les sous-produits de dégradation du perchloroéthylène suivants : phosgène, trichlorométhane, acide trichloroacétique, CO₂, trichloroacétyl et acide chlorhydrique. Puis ils ont conduit une étude sur un réacteur de laboratoire ouvert avec un média photocatalytique commercial comparable à celui présent dans les épurateurs commercialisés. La concentration en perchloroéthylène correspondait environ à la VLEP 8 h. L'identification des composés organiques est faite sur des prélèvements en sortie d'appareil, après un fonctionnement de 60 minutes. Enfin la dernière phase de l'étude a été conduite dans un pressing dans lequel un épurateur d'air photocatalytique avait été installé par le commerçant. Des prélèvements ont été effectués en sortie de l'appareil, mais également à proximité des postes de travail.

Dans les essais en laboratoire, les mesures à l'entrée du réacteur indiquent une présence majoritaire de perchloroéthylène, de l'ordre de 300 mg.m⁻³, et avec un rendement de dégradation supérieur à 99 %. En sortie de réacteur, les principaux sous-produits identifiés sont : le phosgène, le chlorure de trichloroacétyl, le tétrachlorométhane, le trichlorométhane et l'hexachloroéthane. De l'acide chlorhydrique a également été identifié. Cette étude qualitative confirme les résultats recensés dans la littérature.

Concernant les mesures au sein du pressing dans l'air ambiant, les substances suivantes ont été recherchées : perchloroéthylène, trichlorométhane, tétrachlorométhane, phosgène, acide chlorhydrique, acide fluorhydrique et acide nitrique. En l'absence de technique de prélèvement éprouvée, le chlorure de trichloroacétyl n'a pas été mesuré. Les prélèvements ont été réalisés pendant une journée durant laquelle, d'après les opératrices, la quantité de linge traitée lors du prélèvement était relativement réduite. Seul le phosgène a été mesuré au-dessus de la VLEP sur 8 h (0,08 mg.m⁻³) dans 3 prélèvements sur 8 : 0,108, 0,165 et > 0,650 mg.m⁻³ (en sortie d'appareil). Cette dernière valeur étant supérieure à la VLCT (0,4 mg.m⁻³).

D'après ces résultats et les données disponibles dans la littérature, la mise en œuvre de la photocatalyse pour la dégradation du perchloroéthylène est fortement déconseillée, même en équipant l'épurateur de filtres à tamis ou charbon actif dont il est difficile de prévoir le degré de saturation.

6.2.4.1.3 Effets sur les polluants biologiques

En fonction des conditions, la photocatalyse permet d'agir sur d'autres polluants que les composés organiques. Si le rayonnement lumineux comprend une composante germicide (bande de spectre UV autour de 254 nm), l'accrochage des microorganismes à la surface du catalyseur peut induire un temps d'exposition suffisamment long pour que les microorganismes soient bloqués dans leur reproduction, voire détruits (Blondeau *et al.* 2007).

a) Tsai, Sung, et Song (2011)

Tsai, Sung, et Song (2011) ont étudié les effets d'un épurateur d'air photocatalytique expérimental dans un établissement de soins. Les microorganismes présents étaient *Acinetobacter baumannii*,

Burkholderia cepacia, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* et *Pseudomonas aeruginosa* avec une concentration moyenne de 985 ± 49 UFC/m³ (530 ± 40 à 1298 ± 76 UFC/m³). Les prélèvements ont été faits à 90 et 180 cm de haut. Les résultats de l'étude montrent une synergie entre le catalyseur (Ag/TiO₂) et la lampe UV-A, l'irradiation UV-A étant insuffisante pour éliminer les bactéries de l'air. L'abattement moyen de la concentration totale en bactéries est de 62,4 % à 90 cm et 78,9 % à 180 cm. Les auteurs concluent que les épurateurs d'air photocatalytiques peuvent être utilisés pour désinfecter efficacement les bactéries de l'air intérieur et améliorer la qualité de l'air, dans les institutions médicales, les lieux publics...

Cette conclusion est toutefois à relativiser car l'étude ne prend pas en compte la formation de polluants chimiques secondaires. Or les institutions médicales utilisent de nombreux désinfectants, produits d'entretiens qui émettent des COV, sur lesquels la photocatalyse aura également un effet.

b) Sánchez et al. (2012)

Sánchez et al. (2012) ont étudié l'effet d'un réacteur photocatalytique expérimental muni de lampes UV-A ou UV-C sur les concentrations fongiques et bactériennes dans un laboratoire de 46 m², utilisé par 5 personnes, dont les fenêtres et portes étaient fermées. Les résultats sur les concentrations bactériennes avec la lampe UV-A confirment les résultats de Tsai, Sung, et Song (2011), avec un effet synergique entre la lampe UV-A et le TiO₂, pour un abattement de près de 70 % avec des lampes de 8 et 15W, alors qu'il n'est que de 30 % (8 W) et 48 % (15 W) en l'absence de TiO₂.

Aucune synergie n'a été observée entre la lampe UV-C et le TiO₂, l'efficacité étant même moindre en présence du catalyseur. L'abattement observé est de 64 % (8 W) et 76 % (16 W) en présence de TiO₂, et de 70% (8 W) et 80 % (16 W) pour la lampe seule. D'après l'auteur, cette diminution de l'efficacité pourrait être due à l'absorption d'une partie du rayonnement lumineux par le catalyseur. L'expérience a été répétée, et les taux d'abattement étaient très inférieurs, de l'ordre de 30 %. La différence avec la première série d'essais résidait dans la concentration de bactéries dans l'air : de 50 à 200 UFC.m⁻³ pour la première série à 20 à 80 UFC.m⁻³ pour la seconde. L'auteur suggère que les bactéries de la seconde série étaient plus résistantes, en lien avec les conditions climatiques froides lors de la deuxième série. Des essais complémentaires sur les bactéries identifiées lors de la deuxième série d'expérience ont montré que certaines bactéries étaient résistantes au traitement UV-A photocatalyse et d'autres également au traitement UV-C photocatalyse.

Quelles que soient les conditions, la photocatalyse n'a eu aucun effet sur les espèces fongiques.

L'absence d'effet synergique entre la photocatalyse avec du TiO₂ et une lampe UV-C a également été observé par Hequet et al. (2016) dans une étude expérimentale sur un filtre imprégné de TiO₂ associé à une lampe UV-C. Les essais conduits sur *Bacillus subtilis* et *Penicillium chrysogenum* montrent que l'inactivation sur le filtre non imprégné exposé aux UV-C est plus rapide que sur le filtre imprégné de TiO₂ exposé aux UV-C. Comme Sánchez et al. (2012), Hequet et al. (2016) concluent que la présence du TiO₂ interfère avec l'irradiation.

6.2.4.1.4 Conclusions

Les études mettent en évidence le fait que la photocatalyse génère des sous-produits de réactions : la dégradation des polluants est constituée d'une succession d'étapes qui conduit à la génération de composés intermédiaires, jusqu'à la minéralisation totale théorique. Plusieurs travaux montrent que la réaction de photocatalyse n'est pas toujours aussi complète qu'elle le devrait ; de ce fait, les produits intermédiaires, ou sous-produits peuvent être émis dans l'air. Les produits secondaires peuvent être des cétones, des aldéhydes, des acides organiques... qui peuvent avoir des propriétés plus toxiques et/ou irritantes que les polluants initiaux. Le dispositif fonctionnant sur le principe de la photocatalyse devient alors également une source d'émission de

polluants de l'air intérieur (Mo *et al.* 2009). La formation de sous-produits dépend des polluants initiaux présents dans l'air intérieur et de de la configuration de l'épurateur, ce qui rend difficile la prévision de la génération de sous-produits, qu'elle soit quantitative ou qualitative. Une autre préoccupation est l'inactivation du catalyseur, par exemple par empoisonnement ou encrassement, et l'absence de modèle pour en prédire la durée de vie (Zhong et Haghghat 2015).

L'amélioration de la perception de la qualité de l'air a été évaluée par deux études. En présence de matériaux de construction, la qualité de l'air perçue, l'intensité des odeurs et la fraîcheur de l'air peuvent être significativement améliorées à des taux de ventilation faible et moyen (Kolarik *et al.* 2010, Kolarik et Wargocki 2010), mais en présence de bioeffluents, la qualité de l'air perçue est détériorée, probablement en raison de l'oxydation incomplète des alcools, principaux composés des bioeffluents d'après Kolarik et Wargocki (2010).

Ces résultats confirment la nécessité de réaliser des mesures des polluants lors des études de perception, afin de rechercher la présence de polluants secondaires et l'impact réel de l'épurateur sur la qualité de l'air. En effet une amélioration de la perception de la qualité de l'air, notamment en termes de fraîcheur et odeur ne signifie pas que la qualité de l'air est réellement améliorée d'un point de vue sanitaire.

Concernant l'efficacité sur les contaminants chimiques, parmi les neuf épurateurs testés par Costarramone *et al.* (2015) suivant la norme XP B44-013, trois d'entre eux sont peu ou pas efficaces et émettent des COV lors de leur utilisation, même en l'absence de COV dans l'air. Les autres épurateurs dégradent efficacement l'acétone, le N-heptane, le toluène et l'acétaldéhyde dans une enceinte confinée, avec une minéralisation de plus de 99 %, 5 heures après la mise en fonctionnement de l'épurateur. Les CADR ne sont pas corrélés au débit de l'épurateur et pour un même épurateur, le changement de catalyseur, par un catalyseur identique d'un autre lot conduit à des résultats différents. Si l'augmentation du débit favorise les multiples passages des polluants sur la surface catalytique, et donc leur dégradation, la conception de l'épurateur et son matériau catalytique sont des paramètres qui sont déterminants pour l'efficacité du système.

A noter que cette minéralisation complète en enceinte confinée ne serait pas nécessairement observée dans des conditions réelles d'utilisation, pour une même durée d'utilisation, car le nombre de passages des polluants sur la surface catalytique serait bien moindre.

Dans une autre étude, Costarramone *et al.* (2016) montrent une bonne corrélation entre les résultats suivant la norme XP B44-013 et des essais conduits sur deux épurateurs en conditions « réelles » dans des pièces meublées (mais non habitées), pour les COV les plus lourds qui sont rapidement dégradés, cependant les concentrations en formaldéhyde et acétaldéhyde augmentent légèrement.

Tokarek *et al.* (2011) ont testé un épurateur fonctionnant sur le principe de la photocatalyse et de l'ionisation négative, dans une chambre d'essais de 1 m³, avant et après vieillissement. Pour le toluène et le formaldéhyde, une augmentation significative des concentrations est observée avant et après vieillissement, alors qu'une diminution de la concentration en limonène est observée, de 90 % pour l'appareil neuf, à 50 % pour l'appareil vieilli, ce qui peut laisser supposer une dégradation de l'appareil.

Enfin l'étude de Gérardin *et al.* (2010) montre que dans le cas d'une utilisation en milieu professionnel, qui impliquerait une exposition à des composés spécifiques, une étude préalable sur l'efficacité du système sur ces composés est nécessaire. En effets, dans le cadre de cette étude, l'épurateur confronté notamment à du perchloroéthylène a entraîné l'émission de phosgène à une concentration supérieure à la VLEP en un point de mesure.

Concernant l'efficacité sur les contaminants biologiques, les deux études conduites dans un environnement intérieur recensées montrent que la photocatalyse associée à un rayonnement UV-A peut être efficace sur certaines bactéries. Un effet synergique entre la lampe UV-A et le catalyseur est observé (Sánchez *et al.* 2012, Tsai, Sung, et Song 2011). En effet, le catalyseur permet l'accrochage des microorganismes, ce qui augmente le temps d'irradiation et peut induire un temps d'exposition suffisamment long pour que les microorganismes soient bloqués dans leur reproduction, voire détruits (Blondeau *et al.* 2007). D'après les études recensées, la photocatalyse avec une lampe UV-C n'a pas d'effet synergique sur l'inactivation des bactéries (Hequet *et al.* 2016, Sánchez *et al.* 2012). Enfin, Zhang et Gamage (2010) ont identifié dans leur revue sur les applications de la désinfection photocatalytique des études qui montrent une réduction de la propagation du SRAS dans des avions suite à l'épidémie de 2003, ainsi que la capacité de prototype à inactiver le virus de la grippe aviaire A/H5N2.

Ces résultats montrent que l'efficacité et l'émission de sous-produits varient d'un modèle d'épurateur à l'autre. Il est nécessaire de mettre en place des essais normalisés et d'initier un processus de certification afin d'éliminer les épurateurs les moins efficaces et ceux susceptibles d'émettre des polluants. Néanmoins, les tests en enceintes confinées, définis dans la norme XP B44-013, ne permettent pas de bien évaluer l'efficacité des dispositifs en conditions réelles d'utilisation, pour tous les polluants. Une augmentation des concentrations en formaldéhyde et acétaldéhyde peut être observée en condition réelles, alors qu'elle n'avait pas été observée suivant les tests normalisés.

Le vieillissement de l'appareil est un paramètre à prendre en compte dans les essais d'efficacité, car celle-ci peut être réduite par l'encrassement ou l'empoisonnement du catalyseur. Outre, l'effet du vieillissement sur l'abattement de la concentration en limonène observé dans de l'étude de Tokarek *et al.* (2011), l'effet du vieillissement est mentionné dans plusieurs revues. L'étude de Hay *et al.* (2015) qui a évalué la désactivation du catalyseur dans des réacteurs expérimentaux et commerciaux dans un laboratoire et sur le terrain, est souvent citée. Les résultats sur le terrain montrent une rapide désactivation du catalyseur, de 55 à plus de 90 % après une semaine d'utilisation (4 prototypes testés). Une deuxième série de tests a montré une désactivation de 28 à 80 %. L'étude en laboratoire et sur le terrain a montré une corrélation forte entre le silicium présent à la surface du catalyseur et la désactivation de ce dernier. L'auteur indique que considérant que les siloxanes sont la principale source de silicium dans les COV de l'air ambiant, il est probable que l'empoisonnement du catalyseur soit dû à la photo-oxydation des siloxanes.

Dans une revue Hay *et al.* (2015) indiquent qu'une minéralisation complète n'est possible qu'en laboratoire. La désactivation du catalyseur fait varier sa surface au cours du temps et réduit le nombre de sites actifs disponibles, et donc également le nombre de radicaux disponibles. La minéralisation incomplète devient alors plus présente, ce qui augmente la production de sous-produits. L'effet de la désactivation du catalyseur sur la formation de sous-produits doit être évalué.

Enfin, la question de l'émission de nanoparticules par les épurateurs d'air photocatalytiques est une question qui s'est posée à plusieurs reprises lors de l'instruction de ces travaux. Seules deux études (Costarramone *et al.* 2016, Costarramone *et al.* 2015) ont recherché ces émissions et aucune nanoparticule n'a été détectée.

7 Cas particulier des sprays revendiquant un assainissement ou une épuration de l'air

Le principe des sprays « assainissants » qui repose souvent sur un effet bactéricide, virucide... d'huiles essentielles contenues dans le produit, n'est pas à proprement dit une nouvelle technologie. Il n'était donc pas initialement ciblé par cette auto-saisine. Ces produits entrent dans le champ des biocides qui sont soumis au règlement européen n°528/2012. Par conséquent, à termes, ces sprays devront faire l'objet d'une évaluation dans le cadre des autorisations de mise sur le marché (voir paragraphe 7.2). Pour ces raisons, l'efficacité des huiles essentielles et leurs effets sur la qualité de l'air n'ont pas fait l'objet d'une revue de la littérature scientifique comme pour les autres techniques d'épuration décrites précédemment. Toutefois, considérant la large part de marché que représentent ces produits et plusieurs « signaux d'alerte » recueillis lors des auditions conduites dans le cadre de ces travaux, il est apparu important à l'Anses et aux experts rapporteurs de présenter *a minima* ces signaux d'alertes et les données qui en sont à l'origine, afin d'attirer l'attention du gestionnaire et de la population sur le potentiel danger que peut représenter l'utilisation de ces produits pour certaines populations sensibles.

7.1 Principe

Les sprays « assainissants » recensés dans le cadre de l'étude du marché, revendiquent principalement une action sur les odeurs (69 %) et/ou une action biocide (60 %) : antifongique, bactéricide, virucide, acaricide ou encore insecticide. Soixante-quatre produits ont été recensés, dont 38 sprays à base d'huiles essentielles, les autres produits étant principalement des désodorisants qui revendiquent une « neutralisation » des odeurs et pas un simple « masquage », sans toutefois que le principe de « neutralisation » soit bien défini.

Les produits à bases d'huiles essentielles représentent 59 % des produits référencés et sont notamment commercialisés en pharmacie, commerces « biologiques », l'objectif revendiqué étant d'assainir l'air « naturellement ». Considérant les propriétés anti-allergènes de certaines huiles essentielles, elles sont parfois recommandées chez des patients allergiques.

7.2 Point de réglementation sur les produits biocides

Réglementairement, les produits qui revendiquent une action biocide sont soumis au règlement européen n°528/2012 qui fait suite à la Directive européenne relative aux biocides 98/8/CE. Par conséquent, au terme de la mise en place de ce règlement, ces produits devront faire l'objet d'une autorisation de mise sur le marché (AMM).

Les biocides, au sens de la réglementation sont des substances ou des préparations destinées à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière, par une action chimique ou biologique. Ces produits sont classés en 22 types de produits, qui sont classés dans 4 grands groupes :

- Les désinfectants : types de produits 1 à 5,
- Les produits de protection : types de produits 6 à 13,
- Les produits de lutte contre les nuisibles : types de produits 14 à 20,

- Les autres produits : types de produits 21 et 22.

Les sprays « assainissants » recensés dans l'étude de marché revendiquant des actions biocides peuvent être classés dans les types de produits 2 « Désinfectants et produits algicides non destinés à l'application directe sur des êtres humains ou des animaux » et/ou 18 « Insecticides, acaricides et produits utilisés pour lutter contre les autres arthropodes » et/ou 19 « Répulsifs et appâts ».

L'évaluation des substances et des produits prévue par la réglementation biocide se déroule en deux temps :

1. L'évaluation des substances actives biocides : un ou des notifiant(s) dépose(nt) une demande d'approbation d'une substance active pour un ou plusieurs type de produit. L'évaluation menée par un Etat membre rapporteur est ensuite discutée par l'ensemble des Etats-membres. Si la substance est conforme aux critères réglementaires, elle fait l'objet d'un règlement d'approbation pour un ou des types de produits.
2. Une fois les substances actives approuvées, les produits biocides sont soumis à autorisation de mise sur le marché (AMM). Cette autorisation est donnée sur la base de la démonstration, d'une part de l'efficacité du produit contre les cibles revendiquées, et d'autre part d'un risque acceptable pour l'homme et l'environnement compte tenu des usages revendiqués.

La mise en œuvre du règlement biocide est en cours, la fin du programme d'examen des substances actives inscrites au programme d'examen des substances est prévue pour 2024. Les produits biocides dont les substances actives ne sont pas au programme d'examen sont interdits. Les produits contenant des substances actives approuvées sont soumis à AMM. Les produits biocides dont la substance active est encore en cours d'évaluation, sont dans un régime transitoire, où chaque Etat-membre applique ses dispositions nationales. En France, les produits biocides soumis au régime transitoire sont mis librement sur le marché, à quelques exceptions près pour lesquels un agrément est nécessaire avant mise sur le marché. C'est le cas pour :

- Les produits biocides utilisés contre les maladies contagieuses du bétail soumises à déclaration obligatoire ou contre celles qui font l'objet d'une prophylaxie collective organisée par l'Etat. Le Ministère de l'Agriculture est l'autorité qui délivre l'agrément.
- Les produits désinfectant les réseaux d'eau chaude sanitaire, les eaux thermales et les piscines publiques, ainsi que produits désinfectant l'eau destinée à la consommation humaine et les installations de productions et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine (majoritairement TP 2, 4 et 5). La Direction Générale de la Santé est l'autorité qui délivre l'agrément.
- Les produits utilisés en thanatopraxie pour la conservation des corps (TP22). La Direction générale de la santé est l'autorité qui délivre l'agrément.

Les sprays assainissants ne font a priori pas partie des produits nécessitant un agrément en période transitoire.

Par ailleurs, tous les produits biocides, avec AMM ou en période transitoire, doivent être mis sur le marché en suivant les prérequis suivants :

- contenir des substances actives soutenues dans le programme d'examen pour l'usage adéquat, à savoir listées à l'annexe II du règlement 1062/2014 et n'ayant pas fait l'objet de décisions de non-approbation suite à des abandons,

- être étiquetés conformément aux dispositions de l'article 10 de l'arrêté du 19 mai 2004 relatif au contrôle de la mise sur le marché des substances actives biocides et à l'autorisation de mise sur le marché des produits biocides,
- être déclarés à l'INRS à des fins de toxicovigilance,
- être déclarés auprès de l'Anses avant leur mise sur le marché effective (Anses 2016b).

A ce jour, un produit revendiquant un assainissement de l'air par action biocide, présent sur le marché, dispose soit d'une AMM si sa (ou ses) substance(s) active(s) a (ont) été approuvée(s), ou est mis librement sur le marché si sa (ou ses) substance(s) active(s) est (sont) en cours d'évaluation.

Le géraniol, par exemple, naturellement présent dans plusieurs huiles essentielles, est une des substances actives contenues dans des produits « assainissants » qui est en cours d'évaluation pour les usages TP 18 (Insecticides, acaricides et produits utilisés pour lutter contre les autres arthropodes) et TP 19 (Répulsifs et appâts). Les sprays « assainissants » contenant du géraniol comme substance active sont donc mis librement sur le marché jusqu'à la fin de l'évaluation du géraniol. A l'issue de l'évaluation :

- si le géraniol est approuvé pour les types de produits 18 et 19, le fabricant d'un produit de type 18 ou 19 qui ne contient que du géraniol comme substance active, ou du géraniol avec d'autres substances actives déjà approuvées, devra faire une demande d'AMM en précisant les usages précis revendiqués. Le produit reste sur le marché jusqu'à la fin de son évaluation,
- si le géraniol est approuvé pour les types de produits 18 et 19, le fabricant d'un produit de type 18 ou 19 qui contient d'autres substances actives biocides en cours d'évaluation, doit attendre que les autres substances actives soient approuvées pour faire une demande d'AMM, le produit reste librement sur le marché,
- si le géraniol n'est pas approuvé pour un type de produit, alors les produits de ce type qui contiennent du géraniol en tant que substance active doivent être retirés du marché.

7.3 Evolution de la qualité de l'air liée à l'utilisation de sprays dits « assainissants »

Dans la littérature scientifique, peu de données sont disponibles sur les produits en vente sur le marché français. A l'occasion des auditions conduites dans le cadre de cette expertise, des travaux récents s'intéressant aux émissions issues de l'utilisation de sprays et diffuseurs dits assainissants ont été identifiés. Il s'agit notamment d'études réalisées par l'association UFC Que choisir et l'équipe du professeur Frédéric De Blay, chef du pôle de pathologie thoracique du CHU de Strasbourg. Les données issues de ces études et les informations collectées à l'occasion des auditions sont synthétisés ci-dessous.

7.3.1 Essais « UFC que choisir » (Chesnais et Marchais 2014)

L'association « UFC Que choisir » a réalisé des essais sur sept sprays « assainissants » à base d'huiles essentielles, et huit désodorisants, dont trois revendiquant une action assainissante. Les

résultats de ces essais ont été publiés dans le numéro de novembre 2014 dans l'objectif de comparer leur impact respectif sur la qualité de l'air intérieur des logements.

Les essais ont été réalisés dans des chambres d'émission de 1 m³ suivant les préconisations d'usage de chaque produit en termes de nombre et durée de pulvérisation. Certains produits ne présentant pas de préconisation d'usage, une moyenne des préconisations des autres produits a été appliquée. Les niveaux d'émission ont été ramenés à des pièces de 30 m³ avec un taux de renouvellement de l'air de 0,5.

Ces tests en laboratoire ont montré que les émissions générées entraînaient des concentrations en COV totaux de 475 à 15 790 µg.m⁻³ pour les sprays « assainissants » à base d'huile essentielles et de 514 à 2 717 µg.m⁻³ pour les désodorisants qui revendiquent une destruction des odeurs ou un effet désinfectant. Les COV principalement retrouvés sont les terpènes, dont le linalool et le limonène, à l'exception d'un désodorisant qui émet principalement un phtalate : le DEP.

Concernant les particules fines PM_{2,5}, l'association de consommateurs met en avant les différences entre les vaporisateurs et les aérosols notamment sur le principe de fonctionnement reposant dans le premier cas sur la pulvérisation d'une dose de produit à chaque pression et dans le second cas sur une pulvérisation continue du produit ainsi que du gaz propulseur. Dans l'ensemble, les vaporisateurs émettent beaucoup moins de particules fines que les aérosols : de 0,4 à 10 ppm pour les premiers et de 4 à 780 ppm pour les seconds.

Par ailleurs, l'association de consommateurs souligne que les revendications d'efficacité de ces produits sont souvent biaisées. Ainsi les tests d'efficacité conduits par les fabricants de ces sprays « assainissants » à base d'huiles essentielles suivant des normes NF prévoient que les huiles essentielles soient en contact pendant un temps donné avec les microorganismes. Or les résultats de ce type d'essai ne sont pas extrapolables à un produit pulvérisé dans l'air d'une pièce.

7.3.2 Essais de Delmas et al. (2016)

Delmas *et al.* (2016) ont conduit des essais afin de mesurer la concentration dans l'air de terpènes, dont le limonène, lors de la pulvérisation d'un spray à base d'huiles essentielles revendiquant des propriétés assainissantes de l'air intérieur. Trois protocoles différents ont été déployés pour quantifier le limonène. Les essais pour déterminer la concentration aérienne ont été conduits suivant les préconisations d'usage du produit qui sont de 6 à 8 pulvérisations dans une pièce de 25 m².

→ Méthode

- Protocole n°1 : Calcul de la concentration théorique de limonène dans une et quatre pulvérisations : 3 séries de 10 mesures de la masse totale de la pulvérisation. La masse de limonène est déduite des données de composition du produit obtenues auprès du centre anti-poison de Strasbourg, soit environ 4-5% de limonène.
- Protocole n°2 : Mesure de la concentration aérienne de limonène par un appareil de photo-ionisation dans une cabine de 9 m³ dont le taux de renouvellement d'air était de 30,5 m³.h⁻¹ : deux séries de 10 mesures.
 - Après une pulvérisation au centre de la cabine, la concentration est mesurée toutes les 30 secondes pendant 20 minutes.
 - Après quatre pulvérisations, une aux quatre coins de la cabine, la concentration est mesurée toutes les 30 secondes pendant 30 minutes.

- Protocole n°3 : Mesure de la concentration aérienne de limonène par un appareil de photo-ionisation dans une pièce meublée de 42 m³, avec une fenêtre et une porte, sans ventilation mécanique contrôlée : trois séries de 10 mesures.
 - Après une pulvérisation au centre de la pièce, la concentration est mesurée toutes les 30 secondes pendant 20 minutes.
 - Après huit pulvérisations, deux aux quatre coins de la pièce, la concentration est mesurée toutes les 30 secondes pendant 30 minutes.
 - Après huit pulvérisations, deux aux quatre coins de la pièce, la concentration est mesurée toutes les 30 minutes pendant 3 heures.

A l'occasion de ce protocole des prélèvements actifs ont également été réalisés afin de déterminer par la méthode quantitative spécifique les concentrations de 20 COV terpéniques et dérivés et des aldéhydes.

→ Résultats

♦ Résultats du protocole n°1 : à partir des quantités de limonène contenues dans une et quatre pulvérisations, calculées à partir de la masse d'une et quatre pulvérisations et des données de composition, les concentrations théoriques de limonène dans la cabine de 9 m³ et la pièce de 42 m³ ont été calculées. Les résultats sont donnés dans le Tableau 17.

Tableau 17: mesure de la quantité moyenne de limonène dans 1 et 4 pulvérisations et calcul théorique de la concentration dans la cabine de 9 m³ (procédure n°1)

	1 pulvérisation	4 pulvérisations
Quantité moyenne théorique de limonène (mg)	13,4	57,7
Concentration théorique dans la cabine de 9 m³ (µg.m⁻³)	1490	6410

Cette première expérimentation a permis d'apprécier la reproductibilité des pulvérisations de produit, élément important pour les 2^{ème} et 3^{ème} expérimentations qui ont visé à mesurer les concentrations aériennes précises de limonène suite à des pulvérisations. Les auteurs concluent à une reproductibilité tout à fait satisfaisante, les coefficients de variation étant inférieurs à 20%. Ils observent cependant que les quantités délivrées par pulvérisation étaient plus faibles lorsque le spray était déjà entamé.

♦ Résultats du protocole n°2 (tests dans la cabine de 9 m³) :

« La concentration aérienne moyenne de limonène était de 35 µg/m³ dans l'air de la cabine avant toute pulvérisation d'huiles essentielles.

Une pulvérisation a libéré une concentration moyenne de 10,4 mg/m³. Après une pulvérisation, la concentration maximale de limonène était de 73,6 mg/m³ à 30 secondes, suivie d'une décroissance sur 20 minutes pour atteindre une concentration de 2 mg/m³.

La mesure de la concentration de limonène pendant 30 minutes après 4 pulvérisations aux 4 coins de la pièce a retrouvé un pic de concentration maximale moyenne de 57,3 mg/m³ suivi d'une décroissance sur 30 minutes pour atteindre une concentration de 3 mg/m³.»

♦ Résultats du protocole n°3 (tests dans la pièce de 42 m³) :

Avant chaque test, la concentration résiduelle de limonène a été mesurée. Au maximum, celle-ci a été de 0,026 mg/m³.

La concentration moyenne de limonène mesurée dans l'air sur une période de 30 minutes après 8 pulvérisations étaient de 15 mg/m³. Sur 3 heures, après 8 pulvérisations, la concentration moyenne de limonène est de 7,4 mg/m³. La valeur minimale de limonène 3 heures après les 8 pulvérisations était de 5 mg/m³.

Les mesures réalisées par pompage actif montrent également des concentrations importantes de limonène et de COV terpéniques totaux suite aux pulvérisations : entre 4,8 mg/m³ et 3 mg/m³ pour le limonène et entre 38,9 mg/m³ et 20,8 mg/m³ pour les COV terpéniques totaux.

→ Conclusions

Les résultats montrent que la pulvérisation du produit testé augmente considérablement les concentrations en limonène dans l'air intérieur ; trois heures après huit pulvérisations dans une pièce d'habitat, la concentration est encore près de 200 fois supérieure au taux résiduel maximum qui avait été mesuré avant pulvérisation.

Dans leur discussion, les auteurs indiquent que « *l'exposition aux huiles essentielles peut aggraver l'asthme chez des patients déjà asthmatiques. L'étude de Kumar et al. (1995) a comparé l'exposition à un parfum et à un placebo chez 39 asthmatiques par rapport à 13 témoins. La diminution de la VEMS était significativement plus importante chez les asthmatiques que chez les témoins. De plus la diminution de la VEMS était reliée à la sévérité de l'asthme, soit 36 % pour les asthmes sévères, 17 % pour les modérés et 8 % pour les légers. A côté des asthmatiques, les patients souffrant d'hypersensibilité chimique multiple sont des sujets à risque (Millqvist, Bengtsson, et Löwhagen 1999). Enfin le limonène a également été décrit comme étant un agent de sensibilisation cutanée. En effet, certains patients ont des patchs test positifs aux COV dont le limonène (Rutherford et al. 2007, Buckley et al. 2003, Su et al. 2007). Malgré des données sur le rôle potentiel des COV comme sensibilisant cutané, le mécanisme le plus fréquemment retenu dans la détérioration de la fonction respiratoire chez les patients asthmatiques serait plutôt de type irritatif* ». Les auteurs concluent qu' « *aux vues des données de la littérature, les concentrations élevées de COV terpéniques sont délétères pour les asthmatiques. Par conséquent, l'utilisation d'huiles essentielles sous forme de spray ne doit pas être recommandée chez les patients asthmatiques.* »

7.4 Conclusions

L'association de consommateurs UFC Que Choisir indique qu'un des arguments des fabricants de sprays à base d'huiles essentielles en faveur de leurs produits est que les effets des COV de leurs produits ne seraient pas comparables aux COV de la chimie puisqu'ils proviennent d'essences végétales. Or l'association rappelle qu'une substance qu'elle soit d'origine naturelle ou de synthèse a les mêmes propriétés et donc les mêmes effets sur la santé. Par ailleurs, les précautions d'usages présentées sur l'emballage des vaporisateurs à base d'huiles essentielles mentionnent notamment : « *Ne pas respirer les aérosols* » ou « *Ne pas respirer les vapeurs* », associées à « *Utiliser seulement dans des zones bien ventilées* ».

Concernant les particules fines émises par les aérosols des désodorisants, l'association de consommateurs souligne qu'il y a peu de données sur leur toxicité en lien avec leur composition. Cependant, il est désormais bien établi que plus les particules sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et sont donc susceptibles d'avoir une réactivité plus importante avec l'organisme.

Concernant les effets sur la santé du limonène et autres terpènes, Delmas *et al.* (2016) soulignent que les COV ont été décrits comme irritants pour les bronches, voire potentialisateurs de la réponse bronchique à l'allergène chez les sujets normaux et particulièrement chez les sujets allergiques et asthmatiques lors de test d'exposition aux COV et d'études épidémiologiques. Par ailleurs, l'exposition aux huiles essentielles peut aggraver l'asthme chez des sujets déjà asthmatiques et les fragrances sont également responsables d'asthmes professionnels. Enfin, les terpènes peuvent réagir avec l'ozone présent dans les logements pour former des produits secondaires dont des aldéhydes et notamment du formaldéhyde.

Or les sprays « assainissants » à base d'huiles essentielles peuvent être conseillés à des sujets allergiques qui peuvent être asthmatiques en raison de leur propriétés anti-allergénique. L'étude de Delmas *et al.* (2016) souligne qu'aucune étude contrôlée visant à apprécier les effets cliniques des huiles essentielles chez des sujets présentant des allergies respiratoires n'a été réalisée à ce jour.

Dans son rapport de 2009 relatif à la procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration, l'Afsset préconisait une concentration limite d'intérêt (CLI) en limonène de $450 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, suivant la valeur guide proposée dans le projet européen INDEX (EC 2005, Afsset 2009a). D'après le rapport INDEX (EC 2005), les seuils de détections olfactifs sont $1,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le d-limonène et $2,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le l-limonène. Dès lors que les seuils olfactifs sont atteints, des symptômes irritatifs sont susceptibles d'apparaître chez des sujets normaux. Les concentrations relevées dans l'étude de Delmas *et al.* (2016) sont supérieures à la CLI dans la cabine de 9 m^3 et dans la pièce de 42 m^3 .

En conclusion, les concentrations relevées dans ces deux études sont susceptibles d'entraîner des effets sur la santé, notamment chez les sujets asthmatiques, alors qu'ils font partie de la cible de ces produits qui revendiquent des propriétés limitant les sources d'allergie. Considérant ces signaux récents, l'utilisation d'huiles essentielles sous forme de sprays « ne devrait pas être recommandée » chez les sujets asthmatiques.

8 Conclusion

Ces dernières années le marché des épurateurs de l'air intérieur s'est développé avec la commercialisation d'appareils autonomes, ainsi que des matériaux de construction et de décoration revendiquant des propriétés dépolluantes. Ces dispositifs et produits sont destinés à toute la population, mais peuvent cibler particulièrement les sujets sensibles ou sensibilisés.

Cependant la question de leur efficacité et surtout celle de leur innocuité se pose.

Les recommandations actuelles des pouvoirs publics portent en priorité sur la limitation des émissions à la source, l'aération et la ventilation (INPES 2009).

8.1 Recensement des dispositifs d'épuration de l'air intérieur

L'étude de marché conduite dans le cadre de cette expertise montre que le marché français est un marché émergent encore en pleine évolution, avec une offre croissante chez les fabricants d'électroménagers et chez les fabricants spécialisés dans le traitement de l'air.

Près de 500 dispositifs d'épuration d'air intérieur ont été recensés. Il s'agit majoritairement d'épurateurs d'air autonomes (64 %). Si ces derniers représentent le nombre de références le plus important, ils ne représentent cependant que 0,3 % des parts de marché (environ 7 000 ventes/an). Ces dispositifs autonomes coûtent en moyenne 315 €, mais avec une grande variabilité (< 50 € à > 2000 €), ce qui peut expliquer leur faible pénétration du marché par rapport à d'autres dispositifs moins coûteux tels que les sprays assainissants, naturels ou de synthèse, dont le coût unitaire est en moyenne de 10 à 15 €. Ces derniers dominent d'ailleurs les parts de marché avec 62 % (plus de 22 millions de ventes/an), pour seulement 13 % des références recensées.

Les revendications d'efficacité sont assez hétérogènes et peuvent cibler une substance spécifique ou un mélange de polluants. Elles portent principalement sur les composés organiques volatils (COV) (75 %), les virus, bactéries et moisissures (68 %), les particules (58 %) et les allergènes (pollens, acariens) (54 %). Certaines concernent plus généralement la fumée de cigarette, les odeurs, ou « les polluants de l'air ».

Concernant les technologies d'épuration utilisées, il est important de noter que plus de la moitié des références combinent plusieurs technologies. Les plus présentes sur le marché sont la filtration mécanique (35 % des références), l'ionisation (33 % des références) et l'adsorption physique (24 % des références). Il est à noter que cette expertise a été initiée notamment suite à l'émergence de préoccupations sur la photocatalyse rapportées dans plusieurs travaux de recherche montrant des émissions de sous-produits. Cependant l'étude de marché montre que cette technologie est encore peu répandue et représente moins de 17 % des références.

Enfin, l'étude a permis de mettre en évidence le fait que les technologies des dispositifs mis sur le marché étaient souvent mal décrites sur les dispositifs d'épuration et que l'efficacité revendiquée était rarement justifiée. Les fabricants, « prescripteurs » et associations de consommateurs auditionnés ont souligné la nécessité de normes permettant de justifier l'efficacité des produits. Par ailleurs, les « prescripteurs » indiquent être plus favorables à la prévention par l'élimination des sources de polluants qu'à une approche par épuration de l'air. Si un traitement de l'air s'avère nécessaire, à ce jour seule la filtration mécanique est perçue par ces prescripteurs comme étant

« sans danger ». Il est important de souligner que si ces dispositifs ne sont pas entretenus ils peuvent être à l'origine d'une détérioration de la qualité de l'air.

8.2 Réglementation et normalisation

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis d'identifier de réglementation propre à l'utilisation ou la mise sur le marché de systèmes d'épuration de l'air intérieur en France. A l'étranger, seul l'état de Californie réglemente les émissions d'ozone des dispositifs d'épuration d'air, qui ne doivent pas émettre plus de 0,05 ppm d'ozone.

S'il n'existe pas de réglementation contraignante en France, trois normes, dont deux expérimentales, permettent d'évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes (norme NF B44-200, également applicable aux climatiseurs), l'efficacité des systèmes photocatalytiques sur les COV (norme expérimentale XP B44-013), et d'évaluer les matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des oxydes d'azote (norme expérimentale XP B44-011). Il est important de noter que les essais conduits en laboratoire ne sont pas toujours représentatifs des conditions réelles d'utilisation.

Ces normes représentent un réel progrès car elles proposent des protocoles d'essais normalisés qui permettent de comparer les performances des différents dispositifs entre eux. Elles permettent d'évaluer l'efficacité des dispositifs mais également l'émission de certains produits secondaires. Cependant elles sont encore perfectibles car elles ne prévoient pas toutes ni d'essais en recirculation, qui permettraient de mettre en évidence la formation de sous-produits de réaction des polluants de l'air intérieur avec les émissions de l'épurateur (par exemple, l'interaction entre l'ozone et les terpènes conduit à la formation de particules), ni d'essais de vieillissement afin de mesurer l'éventuelle baisse de performance de l'appareil au cours du temps.

8.3 Répercussions sur la qualité de l'air intérieur de ces dispositifs

L'objectif de ces travaux était d'étudier les effets de la mise en œuvre des dispositifs sur la qualité de l'air dans des conditions réelles ou proches de la réalité. Les études recensées sont peu nombreuses et ne permettent pas de démontrer une efficacité en conditions réelles d'utilisation.

Par ailleurs, ces dispositifs peuvent dégrader la qualité de l'air intérieur en générant de nouveaux polluants. Au vu de l'analyse de la littérature scientifique conduite, il peut être observé :

- Des émissions primaires, intentionnelles ou non, liées au fonctionnement du dispositif (ex : ozone émis par les ozoneurs, mais également par les plasmas),
- La formation de sous-produits liée à la dégradation incomplète des polluants (ex : formation de formaldéhyde du fait d'une dégradation incomplète de l'éthanol par photocatalyse),
- La formation de polluants secondaires liée aux interactions entre les substances générées par l'épurateur et les polluants présents dans les environnements intérieurs (ex : formation de particules secondaires du fait de réaction entre de l'ozone émis par un épurateur à plasma et des terpènes présents dans l'air intérieur),
- Des émissions secondaires liées aux interactions physiques, chimiques ou biologiques entre les polluants piégés dans l'épurateur et des polluants de l'air intérieur. (ex : réactions de polluants de l'air intérieur avec de l'ozone piégé dans le filtre à charbon actif).

Les sprays « assainissants » contenant des huiles essentielles revendiquent une action biocide et sont par conséquent soumis au règlement européen n°528/2012. A termes, ils devront faire l'objet de demandes d'autorisation de mise sur le marché qui prendront en compte les effets sur la santé et l'efficacité du produit. Considérant qu'ils feront dans les années à venir l'objet d'une évaluation dans le cadre de l'implémentation de ce règlement¹¹, il n'a pas été conduit dans le cadre de cette expertise de recherche bibliographique approfondie ni sur l'efficacité biocide des huiles essentielles dispersées dans l'air intérieur, ni sur les effets sur la santé de l'inhalation de ces huiles essentielles. L'expertise présente toutefois deux études récentes pointant des émissions de COV à des niveaux préoccupants.

Il existe à ce jour peu d'études sur les effets, bénéfiques ou délétères, sur la santé à court terme associés à l'utilisation d'épurateurs d'air, et aucune étude sur les effets à long terme n'a été identifiée dans la littérature scientifique.

Par ailleurs, l'utilisation de systèmes d'épuration d'air intérieur conçus pour le grand public pourrait ne pas être adaptée à une utilisation dans des ambiances professionnelles où la nature et le niveau de polluants peuvent être différents de ceux rencontrés dans les environnements intérieurs domestiques.

Le Tableau 18 synthétise les limites des principales techniques d'épuration relevées par l'analyse bibliographique.

¹¹ La mise en œuvre du Règlement Biocides est en cours, la fin du programme d'examen des substances actives inscrites au programme d'examen des substances est prévue pour 2024.

Tableau 18 : Synthèse des limites des principales techniques d'épuration relevées par l'analyse bibliographique.

Technique d'épuration	Principe	Revendications d'efficacité	Limites/inconvénients relevés par l'analyse de la littérature scientifique
Ionisation/filtration électrostatique	Injection d'ions dans l'air qui sont captés par les particules. Les particules chargées sont captées par les surfaces du bâtiment, ionisation simple, ou par des plaques électriquement chargées présentes au sein de l'épurateur dans le cas de la précipitation électrostatique.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Amélioration du bien-être 	<p>L'efficacité est peu démontrée en conditions réelles d'utilisation.</p> <p>Emissions potentielles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ozone → formation de particules secondaires en présence de terpènes • Espèces réactives de l'oxygène → réactions avec les polluants de l'air intérieur pouvant former des polluants secondaires
Ozonation	Oxydation des polluants par la décomposition de l'ozone	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des composés organiques ♦ Elimination des odeurs ♦ Elimination des micro-organismes 	<p>L'ozone peut être efficace sur les contaminants chimiques et biologiques, mais à des concentrations dans l'air qui peuvent avoir un impact sur la santé humaine. L'efficacité est faible aux concentrations d'ozone sans effet sur la santé humaine.</p> <p>La génération d'ozone entraîne des concentrations dans l'air supérieures à 100 µg.m-3 (valeur guide de l'OMS sur 8h dans l'air ambiant)</p> <p>Formation de polluants secondaires, ex :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Particules en présence de terpènes • Acide acétique en présence de formaldéhyde
Plasma froid	Minéralisation des molécules organiques au travers de réactions d'oxydation initiées par les radicaux libres produits dans un champ ionisant.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>Le plasma froid seul a de réelles capacités à minéraliser les polluants en CO₂ et O₂ en conditions expérimentales, mais en pratique, il est observé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une minéralisation incomplète → génération de polluants secondaires • L'émission d'ozone → formation de particules secondaires en présence de terpènes • L'émission d'oxydes d'azote
Plasma/catalyse	Synergie entre un plasma et une catalyse ou photocatalyse, permettant de limiter la génération de polluants secondaires (NO ₂ et O ₃).	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>Les mêmes limites que pour les plasmas froids « seuls » sont recensées, la formation de produits secondaires restant cependant moindre.</p>
Photocatalyse	Activation d'un catalyseur hétérogène par un rayonnement lumineux, souvent une lampe UV. Minéralisation des polluants.	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elimination des contaminants biologiques ♦ Elimination des contaminants chimiques ♦ Elimination des odeurs 	<p>En théorie la photocatalyse aboutit à une minéralisation des polluants en CO₂ et O₂.</p> <p>En pratique la minéralisation est incomplète, ce qui engendre la formation de produits secondaires (ex : cétones, aldéhydes, acides organiques).</p>
Huiles essentielles contenues dans les sprays dits « assainissants »	Action biocide	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Eliminations des bio-contaminants ♦ Elimination des odeurs 	<p>L'efficacité n'a pas été recherchée dans la littérature.</p> <p>La principale limite est l'émission de COV dans l'air intérieur lors de l'utilisation de ces produits. Par ailleurs, la présence d'huiles essentielles dans l'air peut aggraver ou provoquer un asthme.</p>

9 Recommandations

9.1 Mesures de prévention

Pour prévenir des risques liés à une mauvaise qualité de l'air intérieur, il convient en premier lieu de :

- Limiter toutes les sources de pollution pouvant affecter la qualité de l'air intérieur ;
- Ventiler et aérer.

9.2 Evaluation des différents dispositifs d'épuration de l'air

Indépendamment de l'efficacité théorique d'une technologie donnée, ce sont les conditions effectives de sa mise en œuvre qui déterminent l'efficacité.

Dans ce contexte, afin d'assurer la sécurité des utilisateurs, une certification de chaque dispositif qui revendique une épuration de l'air intérieur doit être mise en place.

Les essais devront considérer :

- L'efficacité du dispositif à réduire le ou les polluant(s) visé(s),
- Les émissions de polluants liées au fonctionnement du dispositif,
- Les émissions de sous-produits, issues de la dégradation incomplète de polluants,
- Les réactions des émissions du dispositif avec des polluants présents dans l'environnement intérieur,
- Les effets du vieillissement du dispositif sur l'efficacité et l'émission de polluants et de sous-produits de dégradation.

Enfin, les essais devront être conduits dans les conditions les plus proches possibles de conditions d'utilisation du produit, dans différents environnements ciblés.

Les allégations relatives à l'assainissement de l'air doivent être contrôlées/réglées. Les revendications d'assainissement doivent être précisées avec la liste des polluants ciblés.

Concernant le cas particulier des produits/substances pulvérisés afin d'assainir l'air intérieur, basés sur des propriétés biocides, l'évaluation de l'efficacité dans le cadre du règlement européen n°528/2012 relatif à la mise sur le marché de produits biocides, devra considérer l'efficacité de ces substances sur des micro-organismes aéroportés.

9.3 Information de la population sur l'utilisation de dispositifs d'épuration de l'air

La population doit être informée des risques potentiels d'une dégradation de la qualité de l'air intérieur lors de l'utilisation de certains dispositifs d'épuration. L'attention sera attirée sur le fait que

la dégradation de composés odorants, qui peuvent contribuer à la perception d'une mauvaise qualité de l'air, peut entraîner la formation de sous-produits non-odorants, mais qui peuvent être plus nocifs que les composés initiaux.

Les utilisateurs doivent être informés de l'importance de respecter les instructions d'entretien des dispositifs d'épuration, afin de limiter les risques d'émissions de sous-produits.

Les sujets asthmatiques doivent être mis en garde sur une possible aggravation de leur pathologie lors de la mise en œuvre de tels dispositifs, en particulier les dispositifs utilisant des huiles essentielles et les dispositifs pouvant générer de l'ozone.

9.4 Amélioration des connaissances sur la pertinence de l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur

Des études sur l'impact de l'utilisation d'épurateurs d'air sur la qualité de l'air intérieur en conditions réelles doivent être conduites. Ces études doivent permettre de s'assurer de l'absence d'effets néfastes sur la santé, en particuliers chez les sujets allergiques et/ou asthmatiques.

Bibliographie

- Ademe. 2011. Plantes et épuration de l'air intérieur. In *Les Avis de l'Ademe*: Ademe.
- Afsset. 2006. Procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de COV et de formaldéhyde et de critères sanitaires. Afsset.
- Afsset. 2007a. Les fibres minérales artificielles silicieuses - Fibres céramiques réfractaires - Fibres de verre à usage spécial - Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs. Afsset.
- Afsset. 2007b. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Formaldéhyde. Afsset.
- Afsset. 2007c. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Monoxyde de carbone. Afsset.
- Afsset. 2008a. Les fibres minérales artificielles silicieuses - Laines minérales - Filaments continus de verre - Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs. Afsset.
- Afsset. 2008b. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Benzène. Afsset.
- Afsset. 2009a. Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration. Afsset.
- Afsset. 2009b. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Naphtalène. Afsset.
- Afsset. 2009c. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Tétrachloroéthylène (PCE). Afsset.
- Afsset. 2009d. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Trichloroéthylène (TCE). Afsset.
- AHAM. 2014. "Critères de labélisation des épurateurs d'air." Consulté le 15/4/2014. <http://www.aham.org/consumer/ht/a/GetDocumentAction/i/12100>.
- AHAM. 2016. "Missions de l'AHAM." Consulté le 23/5/2016. http://www.aham.org/AHAM/What_We_Do/AHAM/What_We_Do/What_We_Do.aspx?hkey=f8c95b3b-af5e-4ff3-ab5a-2dca66fbd18.
- Alberici, Rosana M., Maria Anita Mendes, Wilson F. Jardim, et Marcos N. Eberlin. 1998. "Mass spectrometry on-line monitoring and MS2 product characterization of TiO2/UV photocatalytic degradation of chlorinated volatile organic compounds." *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* 9 (12):1321-1327. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-0305\(98\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-0305(98)00112-3).
- Annesi-Maesano, I., M. Hulin, F. Lavaud, C. Raheison, C. Kopferschmitt, F. De Blay, D. A. Charpin, et C. Denis. 2012. "Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study." *Thorax* 67 (8):682-688. doi: 10.1136/thoraxjnl-2011-200391.
- Anses. 2011. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Evolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur. Anses.
- Anses. 2013. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Acroléine. Anses.
- Anses. 2014a. Etat des connaissances sur l'impact sanitaire lié à l'exposition de la population générale aux pollens présents dans l'air ambiant.: Anses.
- Anses. 2014b. Etude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur. Anses.
- Anses. 2014c. Proposition de valeurs guides de qualité de d'air intérieur - Acétaldéhyde. Anses.
- Anses. 2015. Expertise en appui à l'étiquetage des produits d'ameublement. Anses.
- Anses. 2016a. Moisissures dans le bâti. Anses.

- Anses. 2016b. "Procédure de mise sur le marché des produits biocides - période transitoire." Dernière modification 11 juillet 2016 Consulté le 5 avril. http://www.helpdesk-biocides.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=122&lang=fr.
- ANSI/AHAM AC-1-2002. avril 2002. Association of Home Appliance Manufacturers – Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Cord-Connected Room Air Cleaners.
- ANSI/UL 507. Septembre 2007. Standard for Safety for Electric Fans, Ninth Edition. Underwriters Laboratories, Inc. (UL).
- .
- ANSI/UL 867. december 2007. Standard for Electrostatic Air Cleaners, Fourth Edition. Underwriters Laboratories, Inc. (UL), and the associated Certification Requirement Decisions published by UL on March 4, 2008; April 17, 2008; and April 18, 2008.
- .
- ARCAA. 2016. "Air intérieur contrôlé de l'association de recherche clinique en allergologie et asthmologie " Consulté le 23/5/2016. <http://www.arcaa.info/allergen/index.php/le-label/pourquoi-ce-label.html>.
- Ardkapan, S. R., A. Afshari, et N. C. Bergsøe. 2015. "Performance and Effectiveness of Portable Air Cleaners in an Office Room: An Experimental Study." *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9:757-766.
- Ardkapan, S. R., A. Afshari, N. C. Bergsøe, et M. S. Johnson. 2011. "Evaluating the operation of three air cleaners working individually in a clean room." Austin, TX.
- ASHRAE. 2015. ASHRAE Position document on filtration and air cleaning. Atlanta, USA: ASHRAE.
- Auvinen, J., et L. Wirtanen. 2008. "The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality." *Atmospheric Environment* 42 (18):4101-4112. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.01.031.
- Bahri, M., et F. Haghghat. 2014. "Plasma-based indoor air cleaning technologies: The state of the art-review." *Clean - Soil, Air, Water* 42 (12):1667-1680. doi: 10.1002/clen.201300296.
- Bailly, A., M. Clerc-Renaud, et E.T.C. Rutman. 2001. "Traitement de l'air et climatisation, aspects thermiques et mécaniques." *Techniques de l'ingénieur – Traité Génie énergétique – BE972*.
- Bartolomei, V., S. Delaby, D. Boutry, et M. Nicolas. 2016. "Impact of photocatalytic building products on indoor air quality under Visible Light conditions." Indoor Air, Ghent, Belgique.
- Billionnet, C., E. Gay, S. Kirchner, B. Leynaert, et I. Annesi-Maesano. 2011. "Quantitative assessments of indoor air pollution and respiratory health in a population-based sample of French dwellings." *Environmental Research* 111 (3):425-434. doi: 10.1016/j.envres.2011.02.008.
- Blondeau, P., A. Ginestet, F. Squinazi, B. Ribot, et F. De Blay. 2007. "Indoor environment, air quality, and health: Air purifiers - the solution or the problem?" *Environnement intérieur, qualité de l'air et santé: Les épurateurs d'air: La solution ou le pire?* (194):160-168.
- Boehm, H. P., et M. Herrmann. 1967. "Über die Chemie der Oberfläche des Titandioxids. I. Bestimmung des aktiven Wasserstoffs, thermische Entwässerung und Rehydroxylierung." *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie* 352 (3-4):156-167. doi: 10.1002/zaac.19673520306.
- Bonnevie-Perrier, J.C. 2008. "Etude du comportement des aérosols microbiens dans les filtres des réseaux de ventilation du bâtiment." Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, Spécialité : Génie des Procédés.
- Bousselmi, L., A. Ghrabi, K. Ghazzi, G. Zayani, M. Ennabli, S. Geissen, A. Weidemeyer, A. Vogelpohl, D. Bahnemann, et D. Hufschmidt. 2000. "Traitement des eaux usées de

- l'industrie textile par photocatalyse solaire pour réutilisation." 1st International Conference on Wastewater Treatment and Reuse Adapted to the Mediterranean area, Tunis.
- Brenier-Pinchart, M. P., L. Coussa-Rivière, B. Lebeau, M. R. Mallaret, C. E. Bulabois, S. Ducki, J. Y. Cahn, R. Grillot, et H. Pelloux. 2009. "Mobile air-decontamination unit and filamentous fungal load in the hematology ward: How efficient at the low-activity mode?" *American Journal of Infection Control* 37 (8):680-682. doi: 10.1016/j.ajic.2008.12.006.
- Buckley, D. A., R. J. G. Rycroft, I. R. White, et J. P. McFadden. 2003. "The frequency of fragrance allergy in patch-tested patients increases with their age." *British Journal of Dermatology* 149 (5):986-989. doi: 10.1111/j.1365-2133.2003.05491.x.
- Cai, K., X. Liu, Y. Xu, C. Ren, H. Chen, J. Xu, et Z. Yu. 2008. "Damage effects induced by electrically generated negative air ions in *Caenorhabditis elegans*." *Science of the Total Environment* 401 (1-3):176-183. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.03.035.
- Cal-EPA. 2006. Evaluation of Ozone Emissions From Portable Indoor "Air Cleaners" That Intentionally Generate Ozone.
- CARB, Cal EPA -. 2007. "Final regulation order for limiting ozone emissions from indoor air cleaning devices." Consulté le 20 juillet. <http://www.arb.ca.gov/regact/2007/iacd07/finalreg07.pdf>.
- CARB, Cal EPA -. 2015. "Consumers' Air Cleaner Portal." Consulté le 23 juillet. <http://www.arb.ca.gov/research/indoor/aircleaners/consumers.htm>.
- Chesnais, E., et M. Marchais. 2014. "Sprays assainissants et désodorisants - Notre intérieur dégradé." *Que Choisir*, octobre 2014, 53-53.
- CIRC. 1987. Monographie volume 43. Man-made Mineral Fibres and Radon. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- CIRC. 2012a. Monographie 100C. Arsenic, metals, fibres, and dusts. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- CIRC. 2012b. Monographie 106. Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- CIRC. 2012c. Monographie volume 100E. Personal habits and indoor combustions. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- CIRC. 2012d. Monographie volume 100F. A review of human carcinogens. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- CIRC. 2013. Monographie 101. Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking-water. Centre International de Recherche sur le Cancer.
- Cloteaux, A. 2015. "Conception, modélisation et réalisation d'un procédé d'élimination de formaldéhyde dans l'air intérieur." Génie des Procédés et des Produits, Université de Lorraine.
- Cloteaux, A., F. Gérardin, D. Thomas, N. Midoux, et J. C. André. 2014. "Fixed bed photocatalytic reactor for formaldehyde degradation: Experimental and modeling study." *Chemical Engineering Journal* 249:121-129. doi: 10.1016/j.cej.2014.03.067.
- Costarramone, N., C. Cantau, V. Desauziers, C. Pecheyran, B. Kartheuser, T. Pigot, et S. Lacombe. 2016. "Photocatalytic air-purifiers for indoor air: European standard and pilot room experiments." *Indoor Air*, Ghent, Belgique.
- Costarramone, N., B. Kartheuser, C. Pecheyran, T. Pigot, et S. Lacombe. 2015. "Efficiency and harmfulness of air-purifying photocatalytic commercial devices: From standardized chamber tests to nanoparticles release." *Catalysis Today* 252:35-40. doi: 10.1016/j.cattod.2015.01.008.
- Delmas, C., A. S. Weiler, S. Ortega, O. Duong, A. Dazy, M. Ott, C. Schneider, R. Moritz, N. Leclerc, E. Rivière, et F. de Blay. 2016. "Mesure de la concentration aérienne de COV terpéniques (dont le limonène) selon plusieurs procédures lors de pulvérisations d'un

- mélange d'huiles essentielles." *Revue Francaise d'Allergologie* 56 (4):357-363. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.reval.2016.02.005>.
- Deshusses, M. A. 1997. "Biological waste air treatment in biofilters." *Current Opinion in Biotechnology* 8 (3):335-339. doi: 10.1016/S0958-1669(97)80013-4.
- Dickenson, T.C. 1997. *FILTERS AND FILTRATION HANDBOOK (4th Edition)*. Traduit par. Edité. Oxford: Elsevier Science.
- EC. 2005. Joint Research Center - INDEX Project Critical Appraisal of the Setting and implementation of Indoor Exposure Limits in the European Union. édité par European Commission.
- ECARF. 2016a. "Critères de labélisation des épurateurs d'air." Consulté le 23/05/2016. http://www.ecarf-institute.org/en/ecarf-seal-of-quality/criteria-for-ecarf-seal-granting.html?tx_ecarfdownload_pi1%5Bdownload%5D=1&tx_ecarfdownload_pi1%5Bfile%5D=59.
- ECARF. 2016b. "Liste des épurateurs labélisés." Consulté le 23/5/2016. ref : <http://www.ecarf-label.com/en/products/luftreiniger.html>.
- ECARF. 2016c. "présentation ECARF." Consulté le 23/5/2016. <http://www.ecarf.org/fr/qui-sommes-nous/portrait.html>.
- Fang, L., P. Wargocki, A. Targowski, T. Tanaka, et K. Kagawa. 2011. "Performance of a streamer plasma air purifier examined with sensory assessments of air quality." Austin, TX.
- Fanlo, J. L. 1998. "The biological clean-up of the air: Deodorizing bacteria." *Biofutur* (175):20-23.
- Faure, M., F. Gerardin, J. C. André, M. N. Pons, et O. Zahraa. 2011. "Study of photocatalytic damages induced on E. coli by different photocatalytic supports (various types and TiO₂ configurations)." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 222 (2-3):323-329. doi: 10.1016/j.jphotochem.2011.07.003.
- Fishman, D. S. 1981. "SUBJECTIVE COMFORT ASSOCIATED WITH NEGATIVE AIR IONS." *Heating and Ventilating Engineer: The Journal of Environmental Services* 55 (641):13-15.
- Fletcher, L. A., et T. Van Der Graaf. 2011. "Do ioniser devices provide effective control of airborne microorganisms?", Austin, TX.
- Fréalles, E., C. Lestrez, T. Skierlak, D. Melboucy, B. Guery, I. Durand-Joly, L. Delhaes, et N. Loukili. 2011. "Fungal aero-decontamination efficacy of mobile air-treatment systems." *Medical Mycology* 49 (8):825-833.
- Fujishima, A., X. Zhang, et D. A. Tryk. 2008. "TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena." *Surface Science Reports* 63 (12):515-582. doi: 10.1016/j.surfrep.2008.10.001.
- Gandolfo, A., V. Bartolomei, E. Gomez Alvarez, S. Tlili, S. Gligorovski, J. Kleffmann, et H. Wortham. 2015. "The effectiveness of indoor photocatalytic paints on NO_x and HONO levels." *Applied Catalysis B: Environmental* 166-167:84-90. doi: 10.1016/j.apcatb.2014.11.011.
- Gandolfo, A., B. Termime-Roussel, H. Wortham, et S. Gligorovski. 2016. "Photocatalytic nanomaterials as an indoor air remediation technology." *Indoor Air*, Ghent, Belgique.
- Ge, H., D. Hu, X. Li, Y. Tian, Z. Chen, et Y. Zhu. 2015. "Removal of low-concentration benzene in indoor air with plasma-MnO₂ catalysis system." *Journal of Electrostatics* 76:216-221. doi: 10.1016/j.elstat.2015.06.003.
- Geiss, O., C. Cacho, J. Barrero-Moreno, et D. Kotzias. 2012. "Photocatalytic degradation of organic paint constituents-formation of carbonyls." *Building and Environment* 48 (1):107-112. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.021.
- Gérardin, F., A. Cloteaux, M. Guillemot, M. Faure, et J. C. André. 2013. "Photocatalytic conversion of gaseous nitrogen trichloride into available chlorine - Experimental and modeling study." *Environmental Science and Technology* 47 (9):4628-4635. doi: 10.1021/es400588m.

- Gérardin, F., I. Subra, J. Jannot, V. Blachère, M. Guillemeot, et B. Oury. 2010. "Production de phosgène et autres composés lors de la dégradation photocatalytique du perchloroéthylène dans les pressings." *INRS - Hygiène et Sécurité du Travail* ND 2335 - 220 -10: 43-51.
- Hamill, N. A., L. R. Weatherley, et C. Hardacre. 2001. "Use of a batch rotating photocatalytic contactor for the degradation of organic pollutants in wastewater." *Applied Catalysis B: Environmental* 30 (1-2):49-60. doi: 10.1016/S0926-3373(00)00219-8.
- Hawkins, L. H. 1981. "The influence of air ions, temperature and humidity on subjective wellbeing and comfort." *Journal of Environmental Psychology* 1 (4):279-292. doi: 10.1016/S0272-4944(81)80026-6.
- Hawkins, L. H., et L. Morris. 1984. "Air ions and the sick building syndrome." *Indoor Air*, Stockholm, Suède, Août 1984.
- Hay, S. O., T. Obee, Z. Luo, T. Jiang, Y. Meng, J. He, S. C. Murphy, et S. Suib. 2015. "The viability of photocatalysis for air purification." *Molecules* 20 (1):1319-1356. doi: 10.3390/molecules20011319.
- Hequet, V., P. Bruno, C. Hort, V. Platel, J.F. Petit, K. Morisseau, L. Le Coq, et Y. Andres. 2016. "Microorganisms spores inactivation by photocatalysis in air handling unit." *Indoor Air*, Ghent, Belgique.
- Herrmann, Jean-Marie, et Chantal Guillard. 2000. "Photocatalytic degradation of pesticides in agricultural used waters." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIC - Chemistry* 3 (6):417-422. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1387-1609\(00\)01137-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1387-1609(00)01137-3).
- Huang, S. H., C. W. Chen, C. P. Chang, C. Y. Lai, et C. C. Chen. 2007. "Penetration of 4.5 nm to 10 µ m aerosol particles through fibrous filters." *Journal of Aerosol Science* 38 (7):719-727. doi: 10.1016/j.jaerosci.2007.05.007.
- INPES. 2009. Guide de la pollution de l'air intérieur.
- Kim, W. J., N. Terada, T. Nomura, R. Takahashi, S. D. Lee, J. H. Park, et A. Konno. 2002. "Effect of formaldehyde on the expression of adhesion molecules in nasal microvascular endothelial cells: The role of formaldehyde in the pathogenesis of sick building syndrome." *Clinical and Experimental Allergy* 32 (2):287-295. doi: 10.1046/j.1365-2222.2002.01301.x.
- Kivity, S., D. Elbirt, K. Sade, D. Stoeger, et Z. Stoeger. 2009. "Efficacy of the plasma cluster® device in asthmatic and/or allergic rhinitis patients with house dust mite allergy: A prospective observational pilot study." *Israel Medical Association Journal* 11 (2):74-77.
- Kolarik, B., P. Wargocki, A. Skorek-Osikowska, et A. Wisthaler. 2010. "The effect of a photocatalytic air purifier on indoor air quality quantified using different measuring methods." *Building and Environment* 45 (6):1434-1440. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.12.006.
- Kolarik, J., et J. Toftum. 2012. "The impact of a photocatalytic paint on indoor air pollutants: Sensory assessments." *Building and Environment* 57:396-402. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.06.010.
- Kolarik, J., et P. Wargocki. 2010. "Can a photocatalytic air purifier be used to improve the perceived air quality indoors?" *Indoor Air* 20 (3):255-262. doi: 10.1111/j.1600-0668.2010.00650.x.
- Kumar, P., V. M. Caradonna-Graham, S. Gupta, X. Cai, P. N. Rao, et J. Thompson. 1995. "Inhalation challenge effects of perfume scent strips in patients with asthma." *Annals of Allergy, Asthma and Immunology* 75 (5):429-433.
- Laws, C.A. 1982. "Air ions in the working environment." *Heating and Ventilating Engineer*:18-20.
- Li, Y., X. Li, J. Li, et J. Yin. 2006. "Photocatalytic degradation of methyl orange by TiO₂-coated activated carbon and kinetic study." *Water Research* 40 (6):1119-1126. doi: 10.1016/j.watres.2005.12.042.

- Lu, Y., J. Liu, B. Lu, A. Jiang, et C. Wan. 2010. "Study on the removal of indoor VOCs using biotechnology." *Journal of Hazardous Materials* 182 (1-3):204-209. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.016.
- Luengas, A., A. Barona, C. Hort, G. Gallastegui, V. Platel, et A. Elias. 2015. "A review of indoor air treatment technologies." *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. doi: 10.1007/s11157-015-9363-9.
- MEDDE. 2011. Construire sain.
- Mehrotra, K., G. S. Yablonsky, et A. K. Ray. 2003. "Kinetic studies of photocatalytic degradation in a TiO₂ slurry system: Distinguishing working regimes and determining rate dependences." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42 (11):2273-2281.
- Millqvist, E., U. Bengtsson, et O. Löwhagen. 1999. "Provocations with perfume in the eyes induce airway symptoms in patients with sensory hyperreactivity." *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology* 54 (5):495-499. doi: 10.1034/j.1398-9995.1999.00031.x.
- Mills, A., et S. Le Hunte. 1997. "An overview of semiconductor photocatalysis." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 108 (1):1-35.
- Mo, J., Y. Zhang, Q. Xu, J. J. Lamson, et R. Zhao. 2009. "Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review." *Atmospheric Environment* 43 (14):2229-2246. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.01.034.
- NF EN 13779. juillet 2007. Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air. AFNOR (Indice de classement : E51-744).
- Ondarts, M. 2008. "Evaluation des performances d'un bioprocédé pour la dépollution de l'air intérieur." Ph.D, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Ondarts, M., C. Hort, S. Sochard, V. Platel, L. Moynault, et F. Seby. 2012. "Evaluation of compost and a mixture of compost and activated carbon as biofilter media for the treatment of indoor air pollution." *Environmental Technology* 33 (3):273-284. doi: 10.1080/09593330.2011.570793.
- OQAI. 2009. Etat de la ventilation dans le parc de logements français. OQAI.
- OQAI. 2010. Pollution de l'air intérieur: quel potentiel d'épuration par les plantes? In *Bulletin de l'OQAI*: OQAI.
- OQAI. 2012. L'épuration par photocatalyse - Opportunité ou menace pour la qualité de l'air intérieur? In *Bulletin de l'OQAI*: OQAI.
- Park, C., Y. Hwang, J. Lee, et Y. Ahn. 2011. "Characteristic analyses of plasma air cleaning systems for the removal of indoor air pollutants." *Particulate Science and Technology* 29 (4):333-344. doi: 10.1080/02726351.2010.503260.
- Ribot, B., P. Frochot, P. Blondeau, A. Ginestet, F. Squinazi, F. De Blay, et M. Ott. 2006. Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration d'air.
- Richardson, G., D. J. Harwood, S. A. Eick, F. Dobbs, et K. G. Rosén. 2001. "Reduction of fine airborne particulates (PM₃) in a small city centre office, by altering electrostatic forces." *Science of the Total Environment* 269 (1-3):145-155. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00823-8.
- Rosén, K. G., et G. Richardson. 1999. "Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism - A hypothesis." *Science of the Total Environment* 234 (1-3):87-93. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00266-1.
- Rutherford, T., R. Nixon, M. Tam, et B. Tate. 2007. "Allergy to tea tree oil: Retrospective review of 41 cases with positive patch tests over 4.5 years." *Australasian Journal of Dermatology* 48 (2):83-87. doi: 10.1111/j.1440-0960.2007.00341.x.
- Sánchez, B., M. Sánchez-Muñoz, M. Muñoz-Vicente, G. Cobas, R. Portela, S. Suárez, A. E. González, N. Rodríguez, et R. Amils. 2012. "Photocatalytic elimination of indoor air

- biological and chemical pollution in realistic conditions." *Chemosphere* 87 (6):625-630. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.01.050.
- Santé Canada. 2012. "Santé de l'environnement et du milieu de travail - L'ozone." Dernière modification 29/03/2012 Consulté le 29/11/16. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/in/poll/ozone/index-fra.php>.
- Scacchi, G., M. Bouchy, J. F. Foucaut, et O. Zahraa. 1996. "Cinétique et catalyse." *Lavoisier – Tec & Doc*.
- Scheepers, P. T. J., A. Oerlemans, I. Ottenbros, et J.W.H. Sanderink. 2016. "Current knowledge on the health benefits and risks of indoor air ionization." *Indoor Air*, Ghent, Belgique.
- Schmid, S., M. C. Jecklin, et R. Zenobi. 2010. "Degradation of volatile organic compounds in a non-thermal plasma air purifier." *Chemosphere* 79 (2):124-130.
- Shaughnessy, R.J., E. Levetin, J. Blocker, et K.L. Sublette. 1994. "Effectiveness of portable indoor air cleaners - sensory testing results." *Indoo Air-International Journal of Indoor Air Quality and Climate* 4:179-188.
- Shimizu, K. 2011. *Indoor Air Control by Microplasma*. Traduit par. Edité, *Advanced Air Pollution*.
- Shimizu, K., M. Blajan, et T. Kuwabara. 2011. "Removal of indoor air contaminant by atmospheric microplasma." *IEEE Transactions on Industry Applications* 47 (6):2351-2358. doi: 10.1109/tia.2011.2168509.
- Siegel, J. A., M. S. Waring, X. Yu, et R. L. Corsi. 2008. "Do ion generators have a role in sustainable indoor environments?", Baltimore, MD.
- Skulberg, K. R., B. Hellum, et O. Sjøvold. 2011. "Air cleaners and changes of indoor air quality and health-an intervention study." *Indoor Air*, Austin, TX.
- Skulberg, K. R., K. Skyberg, K. Kruse, W. Eduard, F. Levy, J. Kongerud, et P. Djupesland. 2005. "The effects of intervention with local electrostatic air cleaners on airborne dust and the health of office employees." *Indoor Air* 15 (3):152-159.
- Su, H. J., C. J. Chao, H. Y. Chang, et P. C. Wu. 2007. "The effects of evaporating essential oils on indoor air quality." *Atmospheric Environment* 41 (6):1230-1236. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.09.044.
- Sultana, S., A. M. Vandenbroucke, C. Leys, N. De Geyter, et R. Morent. 2015. "Abatement of VOCs with alternate adsorption and plasma-assisted regeneration: A review." *Catalysts* 5 (2):718-746. doi: 10.3390/catal5020718.
- Tanaka, T., K. Kagawa, Y. Narita, et A. Nozaki. 2016. "Durabilité de HCHO removal efficiency of air cleaner with plasma discharger." *Indoor Air*, Ghent, Belgique.
- Thevenet, F., L. Sivachandiran, O. Guaitella, C. Barakat, et A. Rousseau. 2014. "Plasma-catalyst coupling for volatile organic compound removal and indoor air treatment: A review." *Journal of Physics D: Applied Physics* 47 (22). doi: 10.1088/0022-3727/47/22/224011.
- Tokarek, S., N. Barreau, S. Capela, M. Nicolas, F. Maupetit, S. Ritoux, F. Squinazi, G. Guillosoy, V. Ezratty, et É Robert-Gnansia. 2011. "Characterisation of the efficacy of a stand-alone photocatalytic air purifier in removing chemicals and particles." *Caractérisation de l'efficacité chimique et particulaire d'un épurateur d'air photocatalytique autonome* 10 (1):35-45.
- Truc, A. 2007. "Traitements tertiaires des effluents industriels – Désinfection." *Techniques de l'ingénieur – Traité Génie énergétique – BE972 G1310*.
- Tsai, T. T., W. P. Sung, et W. Song. 2011. "Identification of indoor airborne microorganisms and their disinfection with combined Nano-Ag/TiO₂ photocatalyst and ultraviolet light." *Environmental Engineering Science* 28 (9):635-642. doi: 10.1089/ees.2010.0306.
- US-EPA. 2009. Residential Air Cleaners (Second Edition): A Summary of Available Information. Washington DC.

- US-EPA. 2014. Ozone Generators that are Sold as Air Cleaners: An Assessment of Effectiveness and Health Consequences. Washington DC.
- Van Gulijk, C., et E. A. Bal. 2004. "Measurement of aerosol filtration for ultrafine particles." *Journal of Aerosol Science* 35 (SUPPL. 2):S979-S980.
- Vandenbroucke, Arne M., Rino Morent, Nathalie De Geyter, et Christophe Leys. 2011. "Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement." *Journal of Hazardous Materials* 195:30-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.060>.
- Wang, J. H., et M. B. Ray. 2000. "Application of ultraviolet photooxidation to remove organic pollutants in the gas phase." *APCCHE '99: 8th Congress of the Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering* 19 (1-2):11-20. doi: 10.1016/S1383-5866(99)00078-7.
- Wang, W., C. G. Silva, et J. L. Faria. 2007. "Photocatalytic degradation of Chromotrope 2R using nanocrystalline TiO₂/activated-carbon composite catalysts." *Applied Catalysis B: Environmental* 70 (1-4):470-478. doi: 10.1016/j.apcatb.2005.11.034.
- Wang, Z., et J.S. Zhang. 2011. "Characterization and performance evaluation of a full-scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality." *Building and Environment* 46:758-768.
- Waring, M. S., et J. A. Siegel. 2011. "The effect of an ion generator on indoor air quality in a residential room." *Indoor Air* 21 (4):267-276. doi: 10.1111/j.1600-0668.2010.00696.x.
- Waring, M. S., J. A. Siegel, et R. L. Corsi. 2008. "Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners." *Atmospheric Environment* 42 (20):5003-5014. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.011.
- Weschler, C. J., A. T. Hodgson, et J. D. Wooley. 1992. "Indoor chemistry: Ozone, volatile organic compounds, and carpets." *Environmental Science and Technology* 26 (12):2371-2377. doi: 10.1021/es00036a006.
- Wu, C. C., et G. W. M. Lee. 2004. "Oxidation of volatile organic compounds by negative air ions." *Atmospheric Environment* 38 (37):6287-6295.
- Wyon, D. P. 1992. "Sick buildings and the experimental approach." *Environmental Technology (United Kingdom)* 13 (4):313-322. doi: 10.1080/09593339209385159.
- Zhang, X. J., L. Fang, P. Wargocki, D. Szulc, T. Tanaka, et K. Kagawa. 2011. "Effect of streamer plasma air purifier on SBS symptoms and performance of office work." Shanghai.
- Zhang, Z., et J. Gamage. 2010. "Applications of photocatalytic disinfection." *International Journal of Photoenergy* 2010. doi: 10.1155/2010/764870.
- Zhong, L., et F. Haghghat. 2015. "Photocatalytic air cleaners and materials technologies - Abilities and limitations." *Building and Environment* 91:191-203. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.01.033.
- Zuo, G. M., Z. X. Cheng, H. Chen, G. W. Li, et T. Miao. 2006. "Study on photocatalytic degradation of several volatile organic compounds." *Journal of Hazardous Materials* 128 (2-3):158-163. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.056.

ANNEXES

Annexe 1 : Auto-saisine



DECISION N°

AUTOSAISINE

2012 -SA- 0 2 3 6

Le directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses),

Vu le code de la santé publique, et notamment son article L. 1313-3 conférant à l'Anses la prérogative de se saisir de toute question en vue de l'accomplissement de ses missions,

Décide :

Article 1^{er}.- L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail se saisit afin de réaliser une expertise dont les caractéristiques sont listées ci-dessous.

1.1 Thématiques et objectifs de l'expertise

L'objectif de cette autosaisine est d'identifier et d'analyser les différentes techniques de traitement d'air ou d'épuration de l'air et leurs émissions de substances afin d'évaluer l'innocuité liée à l'utilisation de ces traitements assorti éventuellement de préconisations d'usage.

1.2 Contexte de l'autosaisine

Dans le contexte énergétique actuel, avec un renforcement de l'isolation des bâtiments et un taux de renouvellement d'air de plus en plus maîtrisé, les systèmes d'épuration d'air commercialisés pour le grand public pourraient représenter une méthode efficace pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Les systèmes actuels n'ont pas toujours prouvé leur innocuité.

Peu de données chiffrées sont disponibles pour juger de l'efficacité d'épuration de ces appareils, dont les technologies peuvent mettre en œuvre des filtres à particules, une ionisation, des charbons actifs, la photocatalyse ou du plasma froid. Deux normes ont été publiées récemment notamment sur les méthodes d'essais qui permettent d'évaluer les performances intrinsèques des épurateurs d'air (efficacité d'épuration vis-à-vis de polluants, calcul du débit d'air épuré, mesure de la puissance acoustique) (normes XP B44-011, XP B44-013 (2009) et norme XP B44-200 (2011)).

Les résultats d'études récentes (CSTB, LHVP, CETIAT, INRS) indiquent une efficacité variable et parfois faible, une émission de substances par l'appareil en lui-même et l'apparition de sous produits réactionnels potentiellement dangereux. Ces résultats concernent des épurateurs d'air photocatalytiques autonomes commercialisés pour le grand public mais également des appareils photocatalytiques distribués en milieu industriels. Plusieurs études de l'INRS ont souligné la production de sous produits consécutifs au traitement de l'air pollué notamment par le tétrachloroéthylène ou d'autres substances.

Des résultats de ces études menées par l'INRS et le consortium (CETIAT, LHVP, EDF, LEPTAB, Hôpitaux universitaires de Strasbourg, Tera Environnement) ont été présentés au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » en septembre 2011. Ces présentations ont mis en évidence que ces dispositifs d'épuration de l'air, notamment ceux fonctionnant sur le principe de la photocatalyse, ne sont pas sans danger et le CES a souligné l'importance de la problématique, et la nécessité de travailler sur le sujet.

1.3 Questions sur lesquelles portent les travaux d'expertise à mener

L'autosaisine se structure autour de deux axes de travail :

1. **Recenser les techniques d'épuration d'air (hors filtration)** utilisées en environnement intérieur pour le grand public et pour de petites unités volumétriques ou en traitement d'appoint en milieu professionnel¹ (caractéristiques techniques, modalités de mise en œuvre, processus d'élimination, efficacité revendiquée, spectre d'activité pour les substances chimiques, particules, agents biologiques, etc.). Il s'agira d'identifier les nouvelles technologies d'épuration d'air qui sont apparues sur le marché ces dernières années. De ce fait, les techniques reposant sur la filtration, ne sont, *a priori*, pas couvertes ;
2. **Rassembler et analyser les connaissances disponibles** sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation de ces systèmes d'épuration d'air, notamment en présence de mélanges de polluants (polluants traités, non traités et secondaires) et en fonction de la mise en œuvre des dispositifs. Il ne s'agira pas d'évaluer l'efficacité des différents dispositifs sur le marché.

Dans le cadre de ces travaux, l'Anses pourra se rapprocher d'autres organismes disposant d'une expertise dans ce domaine, notamment le CSTB, le LHVP, le CETIAT, l'Ademe et l'INRS qui ont conduit et poursuivent des études sur les systèmes d'épuration d'air.

1.4 Durée prévisionnelle de l'expertise

La durée prévisionnelle de l'instruction de l'autosaisine peut être estimée à 12 mois, à compter de la nomination des experts rapporteurs.

Article 2- Un avis sera émis et publié par l'Agence à l'issue des travaux.

Fait à Maisons-Alfort, le 10 OCT. 2012



Marc MORTUREUX
Directeur général

¹ Les dispositifs utilisés en milieu industriel ; et les systèmes d'épuration d'air intégrés aux systèmes de ventilation des bâtiments collectifs, sont exclus du champ de la saisine.

Annexe 2 : Objet et méthodologie de l'étude de marché

Les éléments ci-après sont issus du rapport de l'étude de marché réalisée et produite par Nomadéis et ULR Valor.

I. Objectifs du marché :

- **Identifier l'ensemble des produits** destinés à l'épuration de l'air intérieur (y compris les plus innovants) commercialisés en France à destination du grand public et des petits professionnels ;
- **Caractériser chacun de ces produits sur le plan technique** (technique d'épuration mise en œuvre, composition du produit, type de polluants traités, conditions d'utilisation, etc.) ;
- **Collecter un ensemble de données économiques sur ces produits** (volume de vente actuel, perspectives d'évolution du marché, structuration du réseau de distribution, etc.).

II. Périmètre

Les produits analysés dans cette étude de marché ont été classés dans 5 familles :

- Les **appareils autonomes d'épuration de l'air intérieur**, allant de petits appareils portatifs dédiés au grand public à des dispositifs adaptés aux professionnels ;
- Les **climatiseurs et systèmes CVC** (Chauffage, Ventilation et Conditionnement de l'air) équipés pour l'épuration de l'air intérieur, dans la mesure où cette action est explicitement revendiquée par le fabricant ;
- Les **matériaux de construction et de décoration** dotés de propriétés d'épuration de l'air intérieur, notamment :
 - **Matériaux de construction** : carrelage, verre, films plastiques, panneaux, enduits, bétons, dalles céramiques, plaques de plâtre, etc. ;
 - **Matériaux de décoration et d'ameublement intérieur** : papier peint, peintures, stores, etc. ;
- Les **objets revendiquant des propriétés d'épuration d'air intérieur** (ampoules ionisantes, clés USB, stations météo, etc.) ;
- Les **sprays et diffuseurs**, dédiés à l'épuration de l'air intérieur. Seuls les produits revendiquant une action sur les odeurs par « **neutralisation** » sont inclus tandis que les produits couvrant les odeurs de type désodorisant sont exclus.

L'intégration d'une nouvelle famille constituée de systèmes végétaux revendiquant une action d'épuration de l'air intérieur (bio-filtration) n'a pas été retenue en raison d'un faible nombre de produits identifiés. En effet, les **plantes** sont exclues de l'étude sauf dans le cas où elles sont intégrées dans des appareils ou vendues exclusivement pour leurs propriétés d'épuration de l'air intérieur, cette thématique de l'épuration par les plantes ayant déjà été étudiée par l'OQAI.

Le périmètre de l'étude a par conséquent été défini sur les bases suivantes :

- Sont inclus tous les systèmes **revendiquant une action d'épuration de l'air intérieur**, et affichant ainsi clairement un argument commercial d'épuration de l'air. Sont ainsi concernés les dispositifs peu onéreux, peu encombrants, auxquels les particuliers peuvent ou veulent croire, même si leurs capacités réelles d'épuration de l'air ne sont pas réellement effectives. Ces produits peuvent être plurifonctionnels, comme les climatiseurs, humidificateurs ou déshumidificateurs qui intègrent également des fonctions d'épuration de l'air. Les matériaux de construction et de décoration revendiquant de telles vertus rentrent également dans le champ de l'analyse. En revanche seuls les ionisateurs revendiquant expressément une action d'épuration de l'air intérieur ont été recensés (les appareils dont la documentation ne met en avant que le bien-être des occupants ont été exclus);

- Ne sont considérés que les produits commercialisés **à destination des particuliers et des petites unités professionnelles** (salons de coiffure, pressings, ongleries, chambres d'hôpital...). Les systèmes de traitement d'air **centralisés**, c'est-à-dire épurant puis distribuant l'air dans l'ensemble d'un bâtiment ou un ensemble de pièces d'un bâtiment sont ainsi hors périmètre d'étude ;
- Sont couverts par l'étude l'ensemble des produits, de marque française ou étrangère, **commercialisés en France**. Concernant la vente en ligne, seuls les **sites francophones**, ciblant clairement une clientèle française et possédant des dispositifs de livraison en France, ont été étudiés ;
- Les **produits en cours de recherche et développement** sont hors périmètre.

III. Méthodologie

1. Analyse documentaire

L'analyse du marché de l'épuration de l'air intérieur s'est appuyée sur une vaste analyse documentaire, dans un premier temps pour cerner de façon approfondie la thématique de l'épuration de l'air intérieur. Les données relatives aux produits d'épuration ont été recueillies sur la base d'environ **185 catalogues, documents techniques, monographies, modes d'emploi** élaborés par les fabricants, ainsi que des **contenus de pages web** produits par les fabricants et les distributeurs.

Nomadéis et ULR Valor ont dans un premier temps procédé à l'identification des fabricants et distributeurs de dispositifs d'épuration de l'air intérieur et au repérage de leurs coordonnées, afin de pouvoir recenser les gammes de produits commercialisés (et recueillir des données et/ou documentations techniques disponibles).

Il est à noter que la qualité et la précision des informations apportées sur les technologies mises en œuvre sont par conséquent extrêmement variables. Nomadéis / ULR Valor ont cependant fait preuve d'une grande rigueur lors de leur traitement en portant une attention particulière aux éléments suivants :

- Nature et provenance de la source documentaire ;
- Niveau de précision et fiabilité de la source documentaire.

Dans le cas de données contradictoires identifiées dans différentes sources, c'est l'information fournie par le fournisseur qui a été privilégiée. Les sources des données prises en compte ont été intégrées à la base pour chacune des références répertoriées.

Focus : Systèmes de ventilation et de climatisation équipés de fonctions d'épuration de l'air

Dans le cas particulier des **systèmes de ventilation ou de climatisation qui intègrent des fonctions d'épuration de l'air**, le recensement et l'analyse ont été effectués à partir de recherches approfondies sur le Web prenant comme point de départ les fabricants de matériels climatiques. Le périmètre de l'étude étant le marché français, seuls les matériels bénéficiant de documentations en langue française (catalogue produits, documentation commerciale, documentation technique, manuel d'utilisation...) ont été considérés, même si ce critère n'est évidemment pas suffisant pour affirmer qu'ils sont effectivement déployés à grande échelle sur le territoire national. Ont également été exclus de l'analyse les matériels qui n'intègrent qu'un filtre mécanique à particules positionné au niveau de la prise d'air, la fonction de ces filtres étant alors davantage de prévenir l'empoussièrement du système que d'améliorer la qualité de l'air intérieur.

Contrairement à ce qui a été fait pour les épurateurs autonomes, l'identification des techniques d'épuration de l'air mises en œuvre dans les appareils n'a pas systématiquement été effectuée sur la base de la description qui en est faite par le fabricant ou les distributeurs. Quand cette dernière s'est avérée être trop sommaire et/ou recourir à une terminologie laissant place au doute, des recherches complémentaires ont été menées afin d'identifier les procédés physico-chimiques réellement intégrés aux appareils et de les répertorier dans la base de données suivant la classification prédéfinie. Ces recherches parfois longues, laborieuses et incertaines nous ont alors conduit à analyser des supports divers et variés écrits en langues étrangères (notices d'utilisation avec vue éclatée des appareils, vidéos promotionnelles du fabricant, articles de revue, brevets...).

2. Entretiens

Cette analyse a été enrichie par la conduite de 28 entretiens qualitatifs auprès de 4 profils d'acteurs :

- **Experts** (instituts de recherche, institutions, etc.) disposant d'une vision large du marché de l'épuration ou d'une connaissance approfondie de certaines technologies d'épuration : François Maupetit (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)) ; Pierre Deroubaix (ADEME) ; Pascal Kaluzny (Tera environnement) ; Alain Ginestet (Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques (CETIAT)) ; Béatrice Caullet (Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris) ; Sylvie Lacombe (Fédération européenne de la photocatalyse (EPF))
- **Fabricants de produits d'épuration de l'air intérieur**, afin de croiser de nouvelles données et sources documentaires avec celles recueillies lors de la recherche documentaire et d'obtenir un retour plus qualitatif : Violaine Ohl-Gasteau (UNICLIMA) ; Olivier Montagne (Tollens - Matéris Peintures) ; Nicolas Laudinet (Air in space) ; Pierre-Jean Vialle (CIAT) ; Hélène Chaumont (Puresentiel) ; Patrick Verlhac (Onip) ; Thierry Ricci (Natéosanté) ; Nadine Vidal (Rowenta) ; Nicolas Wolff (Beewair) ; Valérie Goletto (Saint Gobain) ; Dorothée Waeles (Camfil) ; Marie-Charlotte Bernard (Airlyse) ; Jérôme Coquelet (AirSur)
- **Distributeurs de produits d'épuration de l'air intérieur**, afin notamment de mieux comprendre la perception du marché par ces acteurs : Nicolas Planté (Air Naturel) ; Régis Saulnier (Paris Espace Eco) ; Gilles Mallet (Resolutive / Macorbeille) ; Olivier Dufresnoy (Boulangier)
- **Prescripteurs** (architectes conseils, associations de consommateurs, etc.), dans le but de comprendre leur perception du marché des produits d'épuration et les conseils qu'ils sont susceptibles de donner aux consommateurs : Suzanne Déoux (Medieco) ; Elisabeth Chesnais (UFC Que Choisir) ; Christine Rolland (Asthme et allergies) ; Odile Massot (Santé Environnement pour Tous (SEPT))

3. Visite du salon professionnel Pollutec

La visite du salon Pollutec à Lyon les 2 et 3 décembre 2014 a permis à Nomadéis de rencontrer de premiers acteurs intervenant sur le marché de l'épuration de l'air intérieur ainsi que d'identifier un certain nombre de produits pouvant être intégrés à l'étude.

Cette visite a ainsi été l'occasion :

- De prendre contact avec 6 fabricants de dispositifs d'épuration de l'air intérieur à destination des particuliers ou petits professionnels (plus de 25 produits différents) ;
- De rencontrer 21 acteurs non inclus dans le périmètre de l'étude, majoritairement en raison d'un positionnement orienté vers la dépollution de l'air en milieu industriel uniquement ;
- D'assister à 3 conférences permettant de mieux cerner le contexte de l'épuration de l'air intérieur et la façon dont ce sujet est traité par différents acteurs (fabricants, prescripteurs, institutions telles que l'OQAI). Si l'ensemble des acteurs s'accorde sur le fait que la pollution de l'air intérieur est un enjeu fort, en particulier dans le contexte de la réglementation thermique du bâtiment (RT2012), la question de l'épuration de l'air n'est d'après eux pas la première solution à mettre en œuvre. Une bonne aération ainsi qu'une diminution de la pollution à la source sont nécessaires avant d'envisager l'épuration après une analyse fine des polluants en présence.

Focus : Nécessité de recours aux solutions d'épuration de l'air intérieur

Il est à souligner que **de nombreux acteurs interrogés lors de l'étude, notamment les prescripteurs et experts, soulignent l'importance de la réduction des émissions à la source** (sélection de matériaux ou de mobilier peu émissifs par exemple) ainsi que d'une bonne ventilation et aération des lieux de vie et de travail. Ce n'est que dans le cas où ces conditions sont respectées et qu'un problème de qualité de l'air persiste que doit intervenir l'épuration de l'air. Ceci nécessite alors une analyse des polluants présents afin de mettre en œuvre une solution d'épuration adaptée aux polluants à traiter et à l'environnement d'utilisation.

L'épuration ne serait ainsi pas nécessaire dans la majorité des logements, hormis dans certains cas extrêmes (logements situés dans des zones très soumises à la pollution).

4. Visites terrains

La visite du salon Pollutec a été complétée par une journée de terrain dans plus de 35 enseignes susceptibles de distribuer des produits d'épuration de l'air intérieur. Une priorité a été donnée aux distributeurs « physiques » (par opposition au commerce en ligne) et en particulier aux distributeurs de proximité tels que les pharmacies ainsi que les petites surfaces (drogueries, électriciens, etc.), ces acteurs étant difficiles à mobiliser lors de la consultation en ligne ou par le biais de recherches en ligne.

Type de distributeurs vus lors de la visite terrain

Type de distributeur	Nombre de magasins	Nombre min de produits	Nombre max de produits	Nombre moyen de produits
Grandes surfaces de bricolage / bureautique	5	0	6	2,8
Grandes surfaces généralistes	5	0	9	3,4
Pharmacies	15	0	4	2,3
Petites / moyennes surfaces généralistes	6	2	8	5,3
Magasins bio	2	2	2	2
Commerces de proximité (drogueries, électriciens)	3	0	0	0
TOTAL	36	0	9	

Parmi les 36 commerces visités, seuls 8 ne commercialisaient aucun produit d'épuration de l'air intérieur : 2 pharmacies, les 3 commerces de proximité (drogueries, électriciens), Point P (commercialisation uniquement dans certains magasins), Bricorama, FNAC et Nature & Découvertes. **46 produits différents ont été identifiés dans l'ensemble de ces commerces.**

Alors que Nature & Découvertes commercialisait auparavant des épurateurs autonomes en magasin, ce n'est plus le cas à ce jour en raison d'un certain manque de succès, la sensibilisation auprès du grand public étant encore trop faible. Néanmoins ces produits sont encore vendus via la plateforme en ligne de l'enseigne.

Les pharmacies commercialisent pour la plupart des sprays assainissants, les conseils d'utilisation étant néanmoins fortement variables. **Si certains pharmaciens alertent quant à une sur-utilisation du produit, d'autres n'ont pas de recommandations particulières.** Ces sprays sont principalement mis en vente pour des raisons commerciales, au vu du succès qu'ils représentent, bien que les pharmaciens ne soient pas toujours convaincus de leur efficacité.

5. Consultation en ligne des fabricants et distributeurs

a) Périmètre de la consultation en ligne

La consultation en ligne, initialement prévue uniquement à destination des distributeurs, a été **élargie aux fabricants** de dispositifs d'épuration afin d'assurer une meilleure représentativité des réponses. Les fabricants sont en effet plus facilement mobilisables car plus directement concernés par l'étude.

Les questions de la consultation portaient principalement sur les **aspects économiques**, la majorité des données techniques ayant été pré-identifiées lors des recherches documentaires. La rapidité de réponse au questionnaire est en effet ressortie comme un aspect clé pour que les fabricants et distributeurs acceptent d'y répondre.

Il a été rappelé aux répondants à plusieurs reprises que les données économiques ne seraient pas analysées individuellement mais agrégées. La possibilité de répondre « je ne sais pas », « information non disponible » ou « information confidentielle » a été assurée tout au long du questionnaire.

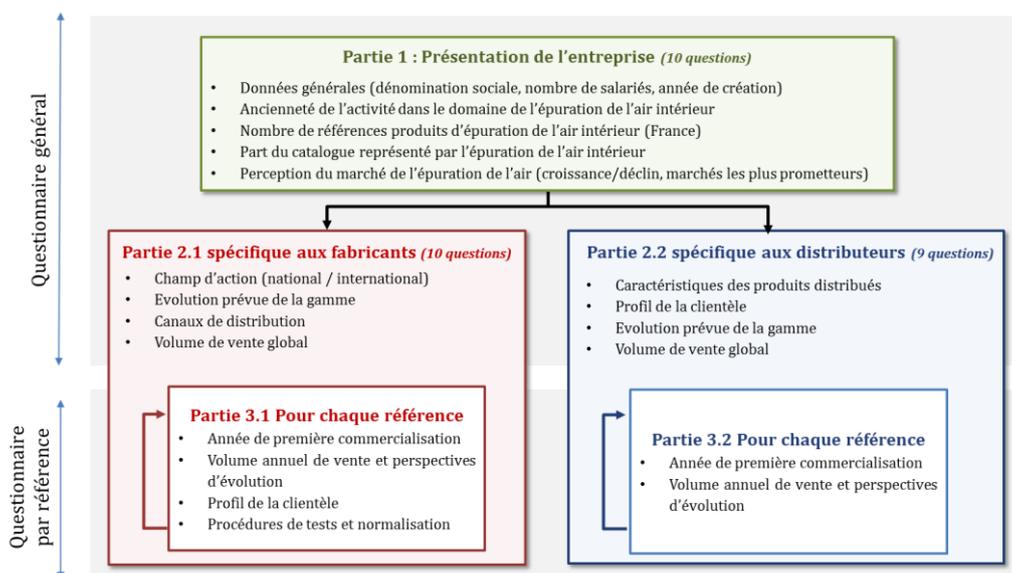
b) Structure du questionnaire

Le questionnaire était structuré en 3 grandes parties, la première étant commune aux fabricants et distributeurs (10 questions). La seconde partie était spécifique à chacune de ces catégories d'acteurs et portait plus précisément sur la gamme de produits d'épuration de l'air intérieur produits ou commercialisés. Enfin, au vu de la structure du marché, composé d'une majorité de distributeurs et fabricants commercialisant un nombre restreint de références, il a semblé pertinent d'**interroger les distributeurs et fabricants par référence**. La troisième partie permettait ainsi aux fabricants et distributeurs d'indiquer les caractéristiques techniques (en particulier concernant la réalisation de tests) et économiques (volumes de ventes actuels et évolution attendue) de chacune de leur référence, ou de leurs 3 références principales.

Cette dernière partie par référence a néanmoins rarement été complétée car elle nécessitait un nouveau passage sur l'interface d'accueil pour chaque référence ajoutée.

Les informations demandées dans les différentes parties du questionnaire ne pouvant pas forcément être complétées par les mêmes personnes au sein d'une même entreprise, un système basé sur des codes uniques transmis aux acteurs par mail permettait de répondre en plusieurs fois.

Structure du questionnaire en ligne administré aux fabricants et distributeurs



c) Invitation de réponse au questionnaire

La plateforme d'accès au questionnaire a été ouverte entre le 2 mars et le 10 avril, soit une durée de **6 semaines**.

Une invitation à répondre au questionnaire, incluant les coordonnées d'Audrey Malrat-Domenge dans un souci de légitimité, a été envoyée à **213 fabricants et distributeurs** sur la durée d'ouverture de la plateforme¹², avec deux relances pour chaque entreprise. **Chacune des invitations envoyées était personnalisée et comprenait ainsi un code unique permettant à chaque entreprise de répondre au questionnaire, ainsi que la liste des produits pré-identifiés par Nomadéis et ULR Valor pour chaque acteur.** Les invitations ont été transmises :

- Par mail lorsque des coordonnées directes étaient disponibles. Le mail comportait alors le logo de l'Anses ainsi qu'un courrier d'accompagnement signé par l'Anses, permettant d'accroître la crédibilité de la démarche auprès des acteurs contactés ;
- Par le biais de formulaires en ligne lorsqu'aucunes coordonnées directes pertinentes n'avaient pu être identifiées, c'est-à-dire dans plus de la moitié des cas.

Par ailleurs une actualité a été publiée sur le site **Construction 21** (média social du bâtiment et de la ville durable), dans la rubrique « Santé dans le bâtiment et qualité de l'air intérieur », en date du 27 mars. Celle-ci avait pour objectif de médiatiser l'initiative de l'Anses dans les réseaux susceptibles d'être intéressés par la thématique de la qualité de l'air intérieur et d'inviter les acteurs pertinents à répondre au questionnaire ou à le relayer.

d) Traitement des résultats

L'ensemble des informations recueillies a été synthétisé dans une base de données sous la forme d'un fichier Excel. Un certain nombre de réponses négatives ont été réceptionnées par Nomadéis, notamment du fait d'un manque de temps ou d'intérêt pour l'étude (4 acteurs), de l'arrêt de commercialisation des produits dépolluants (1 acteur) ou du positionnement d'un acteur en dehors du champ de l'étude.

Par ailleurs, deux acteurs membres de « couples » de fabricants-distributeurs n'ont pas souhaité répondre au questionnaire (Ma Corbeille - Elecomac, Paris Espace Eco - Iqair), et deux acteurs ayant déjà été interrogés en entretien au préalable n'ont pas souhaité répondre à une nouvelle sollicitation. Enfin, quatre sites marchands repertoriés¹³ sont gérés par la société WAF Direct (Air Naturel), qui est distributeur exclusif de différentes marques et n'a ainsi répondu qu'une fois de façon synthétique.

Enfin, 32 entreprises n'ont pu être contactées, les coordonnées identifiées étant défectueuses ou aucunes coordonnées n'étant disponibles après les recherches menées.

Finalement, parmi les 181 invitations envoyées, 23 réponses ont été enregistrées (16 fabricants et 7 distributeurs) soit un taux de réponse de 12,5% (11% de la base interrogée). Ces acteurs représentent un total de 96 produits d'épuration, soit 20% des produits recensés dans la base de données Produits. Ces taux de réponse peuvent être jugés satisfaisants, en particulier au vu de la difficulté du questionnaire, par rapport aux retours habituellement enregistrés dans des enquêtes comparables avoisinant généralement 10% (en rapport à la population totale consultée)¹⁴. L'étude de marché qui suit dans

¹² Parmi les 247 entreprises identifiées, 34 (13,7%) n'ont pu être contactées en raison de coordonnées introuvables ou défectueuses. Le premier envoi a été réalisé du 2 au 6 mars, la première relance du 23 au 26 mars et la seconde relance le 6 avril.

¹³ www.traitementdelair.com, www.airnaturel.com, www.stadlerform.fr et www.blueairfrance.com

¹⁴ Sans aucune incitation, il est satisfaisant de s'attendre à un taux de retour de 10% par une enquête en ligne. - Solène Guillemot. *Les incitations dans les enquêtes en ligne*. Business administration. 2013.

le présent rapport n'est pas uniquement basée sur l'analyse des données recueillies dans le cadre de la consultation en ligne mais s'appuie également sur un ensemble de données contextuelles et d'hypothèses destinées à faciliter un exercice d'extrapolation.

- **Structure de la base de données**

Une base de données unique regroupe l'ensemble des informations présentées dans trois tableaux portant respectivement sur les **produits d'épuration**, les **fabricants** et les **distributeurs de ces systèmes**.

- **Base fabricants**

La base comprenant les informations relatives aux fabricants est structurée en 2 parties :

- **Données générales**

- Dénomination sociale ;
- Localisation (pays) ;
- Ancienneté de l'activité d'épuration de l'air intérieur ;
- Nombre de salariés ;
- Degré de spécialisation : les entreprises dites spécialisées sont tournées vers des activités ayant un lien avec l'épuration de l'air (bricolage, bien-être, aromathérapie, enfance, propreté). Un certain nombre d'entreprises ont été répertoriées comme « ultra-spécialisées » lorsque leur activité est uniquement relative au traitement et/ou à l'épuration de l'air ;

- **Données économiques**

- Offre proposée (nombre de produits par famille et nombre total de produits) ;
- Liste des références produites par le fabricant ;
- Clientèle ciblée (particuliers, professionnels) ;
- Canaux privilégiés pour l'accès aux marchés (*vente directe* : en ligne et par correspondance, en magasin, à domicile, par l'intermédiaire de professionnels ; *vente par des distributeurs* : vente physique, par correspondance, etc.).

- **Base distributeurs**

La base distributeurs est également organisée en 2 parties distinctes :

- **Données générales**

- Dénomination sociale ;
- Taille de l'effectif ;
- Degré de spécialisation : les entreprises dites spécialisées ont été définies par opposition aux entreprises généralistes, quelle que soit leur spécialisation (bricolage, bien-être, aromathérapie, enfance, propreté, électroménager, etc.). Un certain nombre d'entreprises ont été répertoriées comme « ultra-spécialisées » lorsque leur activité est uniquement relative au traitement de l'air ;
- Type de commercialisation (petites, moyennes ou grandes surfaces, vente en ligne, vente par l'intermédiaire de professionnels poseurs, etc.).

- **Données économiques**

- Offre proposée (nombre de produits par famille et total, références proposées) ;
- Volume de ventes sur les dernières années et perspectives d'évolution du marché ;
- Clientèle ciblée (particuliers, professionnels).

- **Base produits**

Cette base répertorie un ensemble d'informations techniques et économiques relatives aux produits. Pour chaque produit, les données suivantes sont renseignées :

- **Données techniques**

- Nom du fabricant (marque) et de la référence ;
- Famille de produits (appareils autonomes, climatiseurs, matériaux de construction et de décoration, sprays, objets autres) ;

- Techniques d'épuration mises en œuvre ;
 - Composition (nature du principe actif, composition détaillée) ;
 - Polluants traités ;
 - Conditions d'utilisation (débit d'air traité et/ou épuré¹⁵, taux d'abattement, surface couverte par l'appareil, ainsi que des informations sur la durée d'efficacité et les besoins de maintenance pour certains dispositifs) ;
 - Appréciation du niveau de confiance attribuable aux informations à la performance des produits (données sans référence, tests du fabricant/par des laboratoires tiers, mesure selon un protocole normé).
- **Données économiques**
 - Prix de vente, avec une mention pour les produits dont le prix n'a pas été identifié, ainsi que les produits n'étant plus commercialisés à ce jour ;
 - Volume de vente en France sur les cinq dernières années ;
 - Publics visés par le produit (particuliers, bureaux, infrastructures de santé, commerces et services, autres) ;
 - Verbatim (éléments de langage relatifs aux propriétés de l'appareil).

Sur la base de recherches bibliographiques et de l'expertise apportée par le consortium ULR Valor / Nomadéis, les technologies d'épuration ont été classifiées d'après les catégories suivantes :

- L'**adsorption chimique** (irréversible), reposant sur le piégeage des polluants gazeux par l'établissement d'une liaison chimique forte et définitive avec les groupements fonctionnels de la surface du média filtrant, ou des molécules présentant des groupements fonctionnels capables d'établir ces liaisons (*scavengers*) intégrés dans un matériau ;
- L'**adsorption physique** (réversible) ou **filtration moléculaire**, s'appuyant sur la captation des molécules gazeuses dans l'air à partir de matériaux présentant une porosité et une surface spécifique très élevées (charbons actifs, zéolites, gels de silice, aluminés activés, polymères) ;
- L'utilisation de **biocides**, principalement sous la forme de substances chimiques injectées dans l'atmosphère, mais pouvant également reposer sur des biocides encapsulés dans un matériau (ions argent par exemple) ;
- La **catalyse** et notamment :
 - La **biocatalyse**, qui repose sur l'utilisation d'un substrat végétal, éventuellement chargé en micro-organismes, pour minéraliser les composés organiques volatils ;
 - La **photocatalyse**, une technologie d'oxydation avancée des oxydes d'azote et composés organiques volatils (COV) reposant sur l'activation d'un matériau semi-conducteur (principalement à base de dioxyde de titane TiO₂) par irradiation UV (naturelle ou par une lampe à UV). Cette technique permet également l'élimination des micro-organismes, soit par l'utilisation de lampes UV germicides (UVC), soit à partir des radicaux libres qui sont produits par le photocatalyseur ;
- La **désinfection thermique**, consistant à éliminer les polluants microbiologiques par une exposition à des températures élevées ;
- La **filtration particulaire** :

¹⁵ Le débit d'air traité est défini comme le débit d'air passant à travers un appareil. Le débit d'air épuré (CADR : Clean Air Delivery Rate), quant à lui, est le débit d'air propre (dépourvu de polluant) avec lequel il faudrait ventiler la chambre expérimentale pour obtenir le même résultat (décroissance de la concentration en polluant) qu'avec l'épurateur d'air.

Source : LEPTIAB, CETIAT, LHVP, GRA, EDF, 2006. *Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration d'air.*

- La **filtration mécanique des particules**, avec des filtres d'efficacité diverses définies par leur classe. Le média filtrant est dans certains cas traité par des substances physiques ou chimiques désinfectantes, évitant ainsi la prolifération des micro-organismes dans le filtre (filtres biostatiques) ;
- La **filtration électronique**, qui a une action sur les particules, soit par sédimentation sur les parois ou le mobilier des particules chargées électriquement, soit par la récupération de ces particules chargées sur un support de charge électrique inverse qui est positionné en aval de l'ioniseur (principe de la précipitation électrostatique).
- L'**ionisation**, qui consiste à produire des ions négatifs qui, une fois émis dans l'air, contribuent à améliorer la sensation de bien-être des occupants et ont une action biocide sur les microorganismes de tous types (destruction par les radicaux libres générés à partir des ions négatifs ou directement par le champ électrique de fort voltage dans lequel passe l'air) ;
- Le **lessivage par l'eau** mis en œuvre par des systèmes appelés « laveurs d'air », faisant passer l'air au travers d'un rideau d'eau retenant les particules. La désinfection de l'eau est généralement assurée par des agents biostatiques ou biocides ;
- L'**ozonation**, reposant sur la capacité de l'ozone à décomposer les molécules (majoritairement organiques) par oxydation, et à éliminer les micro-organismes contenus dans l'air (effet biocide) ;
- Le **plasma froid**, une technique consistant à minéraliser les molécules organiques au travers de réactions d'oxydation initiées par les radicaux libres produits dans le champ ionisant. Cette technique agit sur les composés organiques volatils ;
- Le **rayonnement UV germicide**, possédant la propriété de détruire les micro-organismes (bactéries, virus, moisissures) si l'exposition est suffisamment longue.

Par ailleurs les polluants traités ont été classés en catégories :

- Les **polluants gazeux** :
 - Organiques tels que les composés organiques volatils (COV) et les aldéhydes. Les odeurs, terme générique souvent employé par les fabricants dans la documentation des produits, ont pour origine des gaz ou mélanges de gaz qui appartiennent majoritairement à cette famille ;
 - Inorganiques, tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), l'ozone (O₃), l'ammoniac (NH₃) ;
- Les **particules inertes** souvent dites « poussières » ;
- Les **biocontaminants**, qui désignent les particules vivantes (virus, bactéries) et les particules inertes d'origine végétale ou animale (spores de moisissures, pollens, déjections d'acariens) ;

Une catégorie « **autres** » a par ailleurs été créée pour mentionner les polluants tels que la fumée de cigarette, qui correspond à un mélange de substances appartenant aux différentes catégories citées ci-dessus

- **Limites de l'étude**

La liste des appareils d'épuration d'air recensés n'est pas exhaustive mais est représentative du marché et permet de dégager les principales tendances.

Malgré les efforts entrepris, la classification a parfois été difficile et il peut au final subsister une certaine incertitude sur les fonctions d'épuration réelles de tel ou tel appareil.

Il réside en effet une certaine difficulté dans la lecture et la compréhension des informations communiquées par les fabricants. Le marché étant encore émergent et peu réglementé, **les industriels utilisent fréquemment des argumentaires commerciaux visant à rassurer et convaincre les consommateurs de l'intérêt de l'appareil sans décrire en détail son fonctionnement** et recourent parfois pour cela à des termes inappropriés. Les données ainsi collectées peuvent être entachées d'un certain nombre d'erreurs.

Certains appareils intègrent des **éléments qui sont plurifonctionnels**, par exemple des filtres composés de matériaux visant à la captation ou à l'élimination de différents types de polluants (gaz, particules, microorganismes). Ces matériaux peuvent être entremêlés pour former un média d'apparence homogène, ou répartis en couches assemblées. Dans cette situation, la règle adoptée a été de cocher ou de mentionner le nom de l'élément épurant dans chacune des colonnes correspondant à une technique d'épuration mise en œuvre par l'élément. En conséquence, pour certaines références commerciales, la base de données fait apparaître davantage de modes d'épuration qu'il n'existe physiquement de modules d'épuration à l'intérieur de l'appareil.

Les **multiples effets résultant de l'ionisation de l'air** engendrent de la confusion et une terminologie souvent inadaptée ou imprécise utilisée par les fabricants. Ainsi, sur la base conjointe de l'expertise des supports documentaires et des polluants mentionnés comme étant traités par le fabricant, et indépendamment de la terminologie utilisée par ce fabricant pour nommer le procédé, la fonction d'ionisation a été répertoriée :

- Dans la colonne « ionisation » si l'appareil vise à améliorer la sensation de bien-être ou s'il revendique une action biocide sur les microorganismes de tous types ;
- Dans la colonne « filtration électronique » si le fabricant revendique une action sur les particules ;
- Dans la colonne « plasma froid » si le fabricant revendique une action sur les composés organiques volatils ou les odeurs.

Une **confusion terminologique entoure également le terme de « filtre électrostatique »** décrivant un filtre à particules mettant en jeu des forces électriques. Ce type de filtres peut correspondre à :

- Un filtre mécanique passif chargé électro-statiquement pour renforcer l'adhérence des particules au filtre. Dans la base de données, ce procédé a été assimilé à de la filtration mécanique ;
- Un ioniseur chargeant électriquement les particules pour ensuite favoriser leur sédimentation sur les surfaces internes ou un support intégré à l'appareil (procédé actif, cf. **Erreur ! Source du envoi introuvable.**). Ces appareils ont été classés dans la catégorie filtration électronique.

Enfin, certains **procédés décrits comme étant de la photocatalyse sont entourés par un certain flou**. La documentation et les illustrations relatives à certains appareils dits photocatalytiques ne mentionnent aucunement la présence de lampes, qui sont pourtant une condition *sine qua non* pour parler de photocatalyse. Il pourrait ainsi s'agir de filtres catalytiques activés par un plasma froid généré en amont (technique de plasma-catalyse) ou par un autre phénomène.

Annexe 3 : Compte-rendu de l'audition de UFC Que Choisir, du (10/02/2015)

Contexte et objectif de l'audition

L'audition de Madame Mélanie Marchais (rédactrice technique dans les domaines de la chimie domestique et de l'environnement) et de Monsieur Eric Bonneff (Directeur du service des Essais comparatifs) du département des Essais Comparatifs d'UFC Que Choisir s'est déroulée dans les locaux de l'Anses le 10 février 2015, en présence de Mesdames Audrey Malrat-Domenge, Marion Keirsbulck et Valérie Pernellet-Joly. Un entretien téléphonique préalable s'est tenu le 17 juillet 2014. Ce compte-rendu synthétise les éléments de ces deux échanges.

L'audition a commencé par un tour de table

L'Anses a présenté le contexte et les objectifs de ses travaux.

L'Anses s'est autosaisie sur les dispositifs d'épuration d'air, suite aux présentations en comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » de F. Squinazi des travaux, sur la « Mesures des performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles » et de F. Gérardin sur la photocatalyse. Par la suite, les résultats des ateliers de l'OQAI sur la photocatalyse, ont confirmé la nécessité de travailler sur le sujet. Considérant les résultats de ces études l'Anses s'est autosaisie sur les deux questions suivantes :

1. Recenser les techniques d'épuration d'air utilisées en environnement intérieur pour le grand public et pour de petites unités volumétriques ou en traitement d'appoint en milieu professionnel (caractéristiques techniques, modalités de mise en œuvre, processus d'élimination, efficacité revendiquée, spectre d'activité pour les substances chimiques, particules, agents biologiques, etc.). Il s'agira d'identifier les nouvelles technologies d'épuration d'air qui sont apparues sur le marché ces dernières années ;
2. Rassembler et analyser les connaissances disponibles sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation de ces systèmes d'épuration d'air, notamment en présence de mélanges de polluants (polluants traités, non traités et secondaires) et en fonction de la mise en œuvre des dispositifs. Il ne s'agira pas d'évaluer l'efficacité des différents dispositifs sur le marché.

Le recensement des techniques d'épuration d'air, inclut les appareils autonomes, les climatiseurs munis d'une fonction d'épuration de l'air, les sprays et autres diffuseurs, les matériaux de construction et de décoration, les petits objets...

Pour la première question, l'Anses réalise une étude de marché dans le cadre d'une prestation en cours.

Pour la seconde question, l'Anses appuyée d'experts rapporteurs, réalise une recherche bibliographique, basée sur les publications publiées ces cinq dernières années, qui traitent des substances effectivement traitées par les systèmes d'épurations, ainsi que les produits secondaires potentiellement émis. Les publications avec des essais réalisés en conditions réelles et des dispositifs commercialisés sont privilégiées.

L'objectif de cette audition est d'échanger sur:

- les tests d'émissions sur les sprays assainissants et désodorisants réalisés par UFC Que Choisir (publiés dans Que Choisir, novembre 2014, n°530), ainsi que sur d'autres travaux en cours ou passés sur les dispositifs d'épuration de l'air intérieurs,
- les questions et / ou retours de consommateurs sur les dispositifs d'épuration de l'air intérieur

Travaux d'UFC-Que Choisir en cours ou passé sur l'épuration de l'air intérieur

- Encadré sur un produit Pur Essentiel (composition) dans le dossier Pollution de l'air intérieur d'avril 2014,
- Papier d'enquête sur les purificateurs d'air (Elisabeth Chesnais) de mai 2014,
- Essais en chambre d'émissions de COV sur des sprays assainissants et désodorisants (15 produits), de novembre 2014,

Concernant les tests sur les désodorisants, UFC Que Choisir avait déjà fait des campagnes de mesures en 2004 et 2008.

Le service courrier des lecteurs a été interrogé sur les épurateurs d'air intérieur. Depuis 2007, seuls deux courriers sur le sujet ont été reçus, l'un demandant à UFC Que Choisir s'ils allaient conduire des tests sur des produits et l'autre demandant des références de produits.

Tests d'émissions sur les sprays assainissants et désodorisants réalisés par UFC Que Choisir (publiés dans Que Choisir, novembre 2014, n°530)

L'objectif des essais étaient de rechercher les COV et les particules fines émis par les sprays assainissants et désodorisants

Des tests d'émissions en chambre ont été réalisés par un prestataire, pour le Département Essais comparatifs d'UFC Que Choisir en 2014 sur 7 produits se présentant comme assainissant ou purificateur d'air, un produit un peu à la marge se déclarant désinfectant et 8 désodorisants.

- ✓ Choix des produits testés :
 - Analyse des données de journaux spécialisés (marketing) afin d'identifier les grandes marques
 - Etude des marchés via une documentation spécialisée
 - Questionnaire aux producteurs et repérages en magasin
- ✓ Réalisation des tests :
 - Sur la base des normes ISO 16000, CEN/TS 16516 et du projet européen EPHECT pour les COV
 - Mesure en continu des particules fines
 - Dans une chambre d'essais de 1 m³ avec le spray intégré, afin de limiter les perturbations
 - Quantification de 31 COV pré-identifiés, sur les conseils du prestataire, et des composés majoritairement émis par chaque référence testée
- ✓ Résultats des tests pour le sprays assainissant :
 - La concentration dans une pièce de 30 m³ a été calculée à partir de la concentration mesurée dans la chambre d'essai, en prenant en compte le nombre de pulvérisations recommandé par le fabricant,
 - Le formaldéhyde a été recherché, il est inférieur à la LQ pour tous les produits testés
 - Les COV ont été émis en quantité importante par la plupart des produits se revendiquant assainissant ou purificateur d'air
 - Les particules fines ont été globalement peu diffusées par cette même catégorie de produits
 - Suite au résultat, une phase d'information avec les fabricants et industriels a été organisée, et l'un d'entre eux a indiqué qu'il allait modifier les recommandations d'utilisation.

Un des arguments des distributeurs et fabricants est l'aspect naturel de ces produits à base d'huiles essentielles, toutefois, il est important de souligner que la toxicité des COV ne dépend pas de leur origine, naturelle ou chimique.

Les désodorisants aérosolisés sont susceptibles de se déposer sur les surfaces. UFC Que Choisir n'a pas réalisé de tests sur les poussières déposées.

Epurateurs d'air autonomes

UFC Que Choisir n'a pas réalisé d'essais sur ce type de produits. Il est difficile d'envisager des tests comparatifs, car le fonctionnement de ces appareils dépend beaucoup des conditions réelles d'utilisation. Des tests en laboratoire ne seraient probablement pas représentatifs de la réalité.

Autres dispositifs en lien avec la qualité de l'air intérieur

UFC Que Choisir mentionne les dispositifs connectés qui revendiquent une mesure de la qualité de l'air intérieur qui commencent à apparaître sur le marché. Aucune étude n'est actuellement en cours, mais il y a des interrogations sur la validité de leurs mesures, et la sécurité informatique de ces produits.

L'Anses remercie UFC Que Choisir pour la transmissions de ses données sur le marché de l'épuration de l'air intérieur, ainsi que sur les protocoles d'essais de ses essais sur les sprays assainissants et désodorisants. Il est bien noté que ces données ne peuvent publiées par l'Anses.

Annexe 4 : Compte-rendu de l'audition du Professeur De Blay et de Madame Ott, du (27/03/2015)

Contexte et objectif de l'audition

L'audition du Professeur Frédéric De Blay, pneumo-allergologue, et de Madame Martine Ott, conseillère médicale en environnement intérieur, s'est déroulée par téléphone le 27 mars 2015 en présence de Madame Audrey Malrat-Domenge.

L'Anses rappelle le contexte et les objectifs de ses travaux.

L'Anses s'est autosaisie sur les dispositifs d'épuration d'air, suite aux présentations en comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » de F. Squinazi des travaux, auxquels le Pr. De Blay a collaboré, sur la « Mesures des performances intrinsèques des épurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles » et de F. Gérardin sur la photocatalyse. Par la suite, les résultats des ateliers de l'OQAI sur la photocatalyse, ont confirmé la nécessité de travailler sur le sujet. Considérant les résultats de ces études l'Anses s'est autosaisie sur les deux questions suivantes :

1. Recenser les techniques d'épuration d'air utilisées en environnement intérieur pour le grand public et pour de petites unités volumétriques ou en traitement d'appoint en milieu professionnel (caractéristiques techniques, modalités de mise en œuvre, processus d'élimination, efficacité revendiquée, spectre d'activité pour les substances chimiques, particules, agents biologiques, etc.). Il s'agira d'identifier les nouvelles technologies d'épuration d'air qui sont apparues sur le marché ces dernières années ;
2. Rassembler et analyser les connaissances disponibles sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation de ces systèmes d'épuration d'air, notamment en présence de mélanges de polluants (polluants traités, non traités et secondaires) et en fonction de la mise en œuvre des dispositifs. Il ne s'agira pas d'évaluer l'efficacité des différents dispositifs sur le marché.

Le recensement des techniques d'épuration d'air, inclut les appareils autonomes, les climatiseurs munis d'une fonction d'épuration de l'air, les sprays et autres diffuseurs, les matériaux de construction et de décoration, les petits objets...

Pour la première question, l'Anses réalise une étude de marche dans le cadre d'une prestation en cours.

Pour la seconde question, l'Anses appuyée d'experts rapporteurs, réalise une recherche bibliographique, basée sur les publications publiées ces cinq dernières années, qui traitent des substances effectivement traitées par les systèmes d'épurations, ainsi que les produits secondaires potentiellement émis. Les publications avec des essais réalisés en conditions réelles et des dispositifs commercialisés sont privilégiées.

L'objectif de cette audition est d'échanger :

- sur l'utilisation des huiles essentielles pour épurer l'air intérieur, notamment sur une étude en cours du Professeur De Blay,
- sur la formation des conseillers médicaux en environnement intérieur (CMEI), notamment sur les recommandations éventuelles des CMEI quant à l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur.

Huiles essentielles

Le Pr. De Blay indique que de nombreux patients asthmatiques utilisent des huiles essentielles et peuvent ressentir une gêne. L'objectif de leur étude était de quantifier les quantités de limonène et de COVt émises par des pulvérisations d'un spray d'huiles essentielles commercialisés. L'étude s'est déroulée en trois temps.

- **Sous hotte** : évaluation de la concentration massique en limonène dans des pulvérisations du produit. Les essais ont une bonne reproductibilité, il est à noter que la concentration en limonène est plus importante dans les flacons neufs que dans les flacons usagés. A partir de ces résultats, la concentration théorique en limonène dans une pièce, suite au nombre de pulvérisations préconisé par le fabricant, a été calculée.
- **Dans une cabine de 9 m³, ventilée et régulée** : la concentration en limonène est mesurée par un appareil mobile à photo-ionisation. L'appareil est étalonné pour le limonène. Des séries de mesures ont été faites après 1 et 4 pulvérisations. A noter que le fabricant recommande de réaliser 6 à 8 pulvérisations dans une pièce. Le nombre de pulvérisations a été adapté à la chambre d'essais. Après une pulvérisation la concentration maximale était de 10 mg.m⁻³, suivi d'une décroissance pendant une vingtaine de minutes. Après 4 pulvérisations, la concentration maximale était de 57,30 mg.m⁻³, suivi d'une décroissance de 30 minutes. La concentration résiduelle après 20 et 30 minutes était très supérieure à la concentration de bruit de fond.
- **Dans une pièce de 42 m³ meublée avec fenêtre et porte** : l'objectif est de reproduire des conditions proches de la réalité. 8 pulvérisations du produits ont été faite dans la pièce, conformément à la notice d'utilisation, puis la concentration en limonène a été mesurée pendant 3h. A l'issue de ces 3 heures la concentration résiduelle était de 5 mg.m⁻³. La concentration moyenne sur 30 minutes était de 15 mg.m⁻³. Comme pour les essais dans la chambre, la concentration en limonène résiduelle était bien supérieure à la concentration initiale.

Concernant les effets sur la santé, les travaux d'Isabelle Annessi ont montré le rôle néfaste des COV dans l'asthme et la rhinite. Il n'y a pas d'étude spécifique sur le limonène ; en revanche les terpènes ont été incriminés dans les symptômes d'asthme et de rhinite.

Concernant l'efficacité contre les allergènes, elle reste a priori à démontrer. Le Pr. De Blay, n'a pas d'avis négatif sur les huiles essentielles de manière générale, il faut cependant être vigilant sur le mode d'utilisation. Il n'y a pas de norme sur des limites d'exposition au limonène (il existe le Project INDEX 2005 de l'UE qui mentionne une limite d'exposition de 450 µg.m⁻³) mais il serait pertinent de déconseiller ces produits chez les sujets asthmatiques et / ou allergiques. 30 % de la population née après 1980 serait potentiellement allergique.

Les travaux ont été publiés dans la revue française d'allergologie en juin 2016.

Conseillers médicaux en environnement intérieur

Conservant l'utilisation de systèmes d'épuration de l'air intérieur, Mme Ott indique que d'une manière générale ce sont les solutions d'évictions des sources de contaminants qui sont privilégiées. Lorsque la source l'allergène, par exemple, ne peut être éliminée les CMEI peuvent éventuellement recommander des appareils d'épuration munis de filtres HEPA, notamment pour les allergènes.

Annexe 5 : Aspects réglementaires relatifs à la qualité de l'air intérieur

Les éléments présentés ci-dessous sont notamment issus de l'ouvrage « Construire sain – Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation – mise à jour d'avril 2013 » élaboré sous l'égide des ministères en charge de l'environnement et du logement.



Que disent les **textes de référence** ?

Aération

Les exigences réglementaires relatives à l'aération des locaux en construction neuve ont évolué au fil du temps avec une formulation et une nature différentes en habitat et en secteur autre que d'habitation, ainsi que des dispositions spécifiques figurant par ailleurs dans le code du travail. Ces exigences concernent les conditions d'aération des locaux. Elles consistent notamment en des tailles minimales d'ouvrants ou des volumes minimaux de locaux, des exigences relatives aux grilles d'entrée ou de sortie d'air, aux conduits de ventilation naturelle, ainsi que des valeurs de débits minimaux d'air extrait (habitat) ou d'air neuf entrant (bâtiments autres que d'habitation).

Aération des logements

La première réglementation nationale relative à l'aération des logements a été instaurée par décret du 22 octobre 1955. Avant cette date, le premier règlement sanitaire départemental type (RSDT) de 1937 prévoyait une aération par pièce d'habitation réalisée par des ouvrants de surface minimale. Ce RSDT était défini par un arrêté du 1^{er} avril 1937 du ministre en charge de la Santé, qui imposait aux préfets de l'adapter à leurs départements (arrêtés préfectoraux établissant les règlements sanitaires départementaux [RSD]).

Par la suite, ce sont des arrêtés interministériels (pris en application de décrets fixant les règles générales de construction des bâtiments d'habitation) qui ont fixé les exigences applicables au niveau national en matière d'aération dans les bâtiments neufs. Les RSD* fixent les exigences applicables à l'équipement et à l'aménagement des locaux d'habitation existants ainsi que les exigences d'aération applicables à la construction des bâtiments autres que d'habitation.

Différentes réglementations se sont succédé dans l'habitat neuf.

- **Décret du 22/10/1955** fixant les règles générales de construction des bâtiments d'habitation. L'article 8 prévoit en particulier une aération par pièce en cuisine et par pièce principale ainsi qu'une surface minimum de la partie ouvrante des baies. (En cas de fenêtre étanche dans une pièce, il y a obligation d'aération permanente de cette pièce hors ouverture de baie. Il est prévu également une obligation d'aération permanente en cas de logement dont toutes les baies donnent sur une même façade).
- **Arrêté du 14/11/1958** relatif à l'aération des logements. Il précise les dispositions de l'article 8 du décret du 22/10/1955, notamment pour les cas où une aération permanente par pièce est requise par le décret (ouvertures d'entrée d'air et de sortie d'air).
- **Arrêté du 22/10/1969** relatif à l'aération des logements. Il instaure le principe d'aération générale et permanente du logement, l'entrée d'air se faisant en pièces principales, l'extraction d'air s'effectuant en pièces de service (cuisines, toilettes, salles de bains) par conduits à tirage naturel ou par extraction mécanique.
- **Arrêté du 24/03/1982** relatif à l'aération des logements. Le principe d'aération générale et permanente du logement est repris. L'arrêté précise les valeurs de débits minimums extraits par pièce de service et de débit total extrait selon le nombre de pièces principales du logement. Il prévoit la possibilité de diminuer le débit minimum en cuisine (dispositif individuel de réglage par l'occupant).
- **Arrêté du 28/10/1983** modifiant l'arrêté du 24/03/1982. Il permet une modulation automatique du renouvellement d'air du logement avec réduction du débit total minimal extrait par rapport à celui imposé par l'arrêté du 24/03/1982.
Remarque : dans le cadre de l'arrêté du 22/10/1969 comme dans celui du 24/03/1982 modifié le 28/10/1983, l'aération permanente peut être limitée à certaines pièces seulement dans certaines zones climatiques et pour certains types d'habitat.

* A noter qu'en ce qui concerne les exigences d'aération dans l'habitation, les RSD contiennent principalement des exigences en matière d'occupation, d'usage et d'entretien.

12
CONSTRUIRE SAIN

- **Arrêté du 26/07/1982** relatif à l'aération des foyers. Il concerne les logements-foyers tels que foyers de jeunes travailleurs et foyers pour personnes âgées et reprend les exigences de l'arrêté du 24/03/1982 pour l'aération des logements inclus dans un foyer (mais n'a pas repris les possibilités de modulation automatique des débits autorisées en habitat par l'arrêté du 8/10/1983).
- **Arrêté du 17/04/2009** relatif à l'aération des bâtiments d'habitation neufs dans les DOM.

En cas de travaux dans l'habitat existant, les exigences réglementaires à appliquer sont celles qui étaient en vigueur au moment de la date de dépôt de la demande du permis de construire. Il est toutefois possible d'appliquer les exigences de réglementations ultérieures plus contraignantes, le principe général étant, en cas de travaux, de ne pas entraîner de dégradation par rapport aux performances antérieures.

Performances énergétiques et aération en habitat existant

Lorsque des travaux d'amélioration de la performance énergétique sont réalisés dans les bâtiments existants, des exigences minimales sont requises notamment en aération.

Dans le cas de rénovations lourdes portant sur des bâtiments de plus de 1000 m² achevés après 1948, ceux-ci doivent respecter une exigence de performance énergétique globale et un renouvellement d'air minimal doit pouvoir être assuré (aération par pièce avec entrées d'air minimum en pièces principales ou système de ventilation générale et permanente).

Les autres bâtiments faisant l'objet de travaux d'amélioration de la performance énergétique sont soumis à la réglementation thermique dite « élément par élément ». Celle-ci impose des performances thermiques minimum par élément faisant l'objet de travaux. En particulier, en cas de remplacement de fenêtres en locaux d'habitation ou d'hébergement, les nouvelles fenêtres doivent être équipées d'entrées d'air minimums en pièces principales (sauf naturellement dans les locaux déjà munis d'entrées d'air).

- **Arrêté du 3/05/2007** relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants (réglementation thermique dite « élément par élément »).
- **Arrêté du 13/06/2008** relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1000 m² lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants (réglementation thermique dite « globale »).

Aération des bâtiments autres que d'habitation

Les exigences d'aération des bâtiments autres que d'habitation sont définies par différents textes :

- le règlement sanitaire départemental, pris par arrêté préfectoral sur la base du RSDT (Règlement sanitaire départemental type) et dont les exigences prennent

en compte les personnes non salariées des bâtiments considérés;

- le code du travail, dont les exigences prennent en compte les salariés de ces mêmes bâtiments.

Pour en savoir plus, voir le complément publié en octobre 2015 Concilier les exigences pour un air sain et un bon confort



Règlement sanitaire départemental type (RSDT)

Le titre III du Règlement sanitaire départemental type prévoit aux articles 62 à 66 les dispositions relatives à la ventilation des bâtiments autres que d'habitation. Celle-ci peut être mécanique ou naturelle par conduits ou s'effectuer, pour les locaux donnant sur l'extérieur, par l'ouverture de portes, fenêtres ou autres ouvrants.

Une distinction est faite entre les « locaux à pollution non spécifique » (pollution liée à la seule présence humaine, hors WC et locaux de toilette) et les « locaux à pollution spécifique » (cuisines, salles d'eau, WC, laboratoires et locaux où sont émis certains polluants gazeux non rejetés directement à l'extérieur).

En cas de ventilation mécanique ou naturelle par conduits (article 64), des exigences sont spécifiées concernant le débit minimal d'air neuf à introduire par local, d'une part

pour les locaux à pollution non spécifique, d'autre part pour les locaux à pollution spécifique équipés d'une ventilation indépendante.

En cas de ventilation par ouvrants extérieurs (article 66), des exigences de volume minimum par occupant et de surface minimum d'ouvrants selon la surface au sol des locaux sont fixées.

Par ailleurs, l'article 63 impose que les prises d'air neuf et les ouvrants soient situés au moins à 8 mètres de toute source éventuelle de pollution (véhicules, débouchés de conduits de fumée, sortie d'air extrait) ou comprenant des aménagements tels qu'une reprise d'air pollué n'est pas possible.

Code du travail

Le code du travail distingue également les locaux à pollution spécifique ou non spécifique et le cas d'aération par ouverture des ouvrants d'une part (exigences de volume minimum par occupant et d'ouvrants donnant directement sur l'extérieur) et d'aération par ventilation mécanique ou naturelle permanente d'autre part (exigences de débit minimal d'air neuf entrant par locaux). Ces exigences sont renforcées par rapport à celles du RSDT et concernent les salariés de ces locaux.

→ Articles R. 4222-4 à R. 4222-6.

Remarque : pour les établissements de santé et les hôpitaux, pour certaines salles spécifiques, il est possible de se reporter à la norme NF S90-351:2003 « Établissements de santé, maîtrise de la contamination aéroportée » relative aux salles propres et environnements maîtrisés apparentés (pièces où des gestes interventionnels ou des manipulations de produits peuvent faire courir un risque de contamination au patient). Cette norme est relativement exigeante en termes de maîtrise de la contamination aéroportée dans ces espaces et plus particulièrement de taux de brassage d'air total.

Pour plus d'informations sur la réglementation relative à l'aération des bâtiments :

- [www.developpement-durable.gouv.fr, rubrique Ville durable, aménagement et construction durable > Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Qualité de l'air intérieur > Aération ventilation](http://www.developpement-durable.gouv.fr/rubrique/Ville_durable_aménagement_et_construction_durable_Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Qualité_de_l'air_intérieur_Aération_ventilation)
- [www.territoires.gouv.fr, rubrique Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Qualité de l'air intérieur > Aération ventilation](http://www.territoires.gouv.fr/rubrique/Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Qualité_de_l'air_intérieur_Aération_ventilation)

Normalisation européenne : préconisations

Dans la norme européenne NF EN 13779, les débits de ventilation recommandés diffèrent pour les bâtiments non résidentiels et non industriels. Cette norme propose des débits de ventilation en relation avec différents objectifs de niveaux de qualité d'air intérieur. Un maître d'ouvrage souhaitant respecter cette norme devra toutefois évaluer l'impact énergétique de cette application et notamment sa compatibilité avec la réglementation thermique 2012 (« RT 2012 »).

La norme NF EN 13779 donne également des recommandations pour le choix des filtres en bâtiments non résidentiels et non industriels.

Monoxyde de carbone

Les premières exigences réglementaires visant à limiter le risque d'intoxication au monoxyde de carbone dans les bâtiments neufs et existants ont été introduites il y a maintenant plus de trente ans. D'autres textes sont ensuite venus compléter le dispositif en place, renforçant ainsi les mesures de prévention.

- **Articles L. 131-7 et R. 131-31 à R. 131-37 du code de la construction et de l'habitation.**
- **Arrêté du 22/10/1969** relatif aux conduits de fumée dans les logements.
- **Arrêté du 2/08/1977** relatif aux règles techniques et de sécurité applicables aux installations de gaz combustible et d'hydrocarbures liquéfiés situés à l'intérieur des bâtiments d'habitation ou de leurs dépendances.
- **Arrêté du 23/06/1978** relatif aux installations fixes destinées au chauffage et à l'alimentation en eau chaude sanitaire des bâtiments d'habitation, de bureaux ou recevant du public.
- **Arrêté du 23/02/2009** pris pour l'application des articles R. 131-31 à R. 131-37 du code de la construction et de l'habitation relatif à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone dans les locaux à usage d'habitation.

Ce texte précise notamment les dispositions techniques d'aménagement et de ventilation des locaux à usage d'habitation ou leurs dépendances dans lesquels fonctionnent des appareils fixes de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire, utilisant des combustibles solides ou liquides.

Pour plus d'informations :

- [www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique Ville durable, aménagement et construction durable](http://www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique_Ville_durable_aménagement_et_construction_durable) > Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Monoxyde de carbone
- [www.territoires.gouv.fr_rubrique Bâtiment et construction](http://www.territoires.gouv.fr_rubrique_Bâtiment_et_construction) > Bâtiment et santé > Monoxyde de carbone

Radon

Il n'y a pas à l'heure actuelle d'obligation réglementaire pour les constructions neuves. La réglementation en vigueur consiste en une obligation de surveillance des bâtiments existants.

Protection de la population générale

- **Articles L. 1333-10 et R. 1333-15 à R. 1333-16 du code de la santé publique.**
- **Arrêté du 22/07/2004** relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public.

Depuis 2004, dans les zones géographiques considérées comme prioritaires (soit 31 départements), les propriétaires des établissements sanitaires et sociaux disposant d'une capacité d'hébergement (notamment les crèches et hôpitaux), ainsi que des établissements d'enseignement, pénitentiaires ou thermaux doivent faire réaliser des mesures de surveillance de radon et mettre en

œuvre des actions correctrices lorsque les concentrations en radon sont supérieures à 400 Bq/m³.

Pour plus d'informations :

- [www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique Ville durable, aménagement et construction durable](http://www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique_Ville_durable_aménagement_et_construction_durable) > Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Radon > Obligations pour les lieux ouverts au public
- [www.territoires.gouv.fr_rubrique Bâtiment et construction](http://www.territoires.gouv.fr_rubrique_Bâtiment_et_construction) > Bâtiment et santé > Radon > Obligations pour les lieux ouverts au public

Protection des travailleurs

- **Articles R. 4451-136 à R. 4451-139 du code du travail** relatifs à la protection des travailleurs vis-à-vis de l'exposition au radon d'origine géologique.
- **Arrêté du 7/08/2008** relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail.

Dans les locaux de travail souterrains et les établissements thermaux, pour des activités professionnelles bien spécifiques, les employeurs doivent faire réaliser des mesures de concentration en radon et mettre en œuvre des actions correctives lorsque les concentrations en radon sont supérieures à 400 Bq/m³.



Amiante

Les exigences réglementaires consistent notamment en une recherche des matériaux amiantés, une surveillance de ces matériaux et, le cas échéant, des obligations de travaux.

→ Décret du 24/12/1996 relatif à l'interdiction d'amiante, pris en application des codes du travail et de la consommation.

Protection de la population générale

→ Décret n°2011-629 du 3 juin 2011 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis

→ Articles L. 1334-12-1 à L. 1334-17 et R. 1334-14 à R. 1334-29-9 du code de la santé publique.

Les textes législatifs et réglementaires définissent, pour les bâtiments construits avant 1997, les repérages, constats et mesures d'empoussièrement à effectuer et les éventuelles mesures de protection ou de prévention à prendre en fonction des résultats de ces derniers (travaux, surveillance, mesures d'empoussièrement,

recommandations de gestions adaptées aux besoins de protection des personnes, etc.).

Pour plus d'informations :

□ [www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique Ville durable, aménagement et construction durable > Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Amiante](http://www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique_Ville_durable_aménagement_et_construction_durable_Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Amiante)

□ [www.territoires.gouv.fr_rubrique Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Amiante](http://www.territoires.gouv.fr_rubrique_Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Amiante)

Protection des travailleurs

→ Décret n° 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante

→ Articles R. 4412-94 à R. 4412-148 du code du travail.

Concernant la protection des travailleurs, les textes réglementaires définissent les moyens de sécurité à mettre en œuvre et les formations à dispenser

Pour plus d'informations :

□ www.travailler-mieux.gouv.fr

Étiquetage des produits de construction

Les dispositions législatives et réglementaires visent à informer les consommateurs des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration (peintures, vernis, revêtements de mur, sol ou plafond) mis sur le marché.

→ Articles L. 221-10 et R. 221-22 à R. 221-28 du code de l'environnement.

→ Arrêté du 19/04/2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils. Complété par l'arrêté modificatif du 20/02/2012

Depuis le 1^{er} janvier 2012, les nouveaux produits de construction et de décoration mis à disposition sur le marché doivent être munis d'une étiquette qui indique le niveau d'émission du produit en polluants volatils, par une classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions). Cette obligation s'applique à compter du 1^{er} septembre 2013 pour les produits déjà sur le marché. Les produits concernés par cette nouvelle réglementation sont les produits de construction ou de revêtement de mur, sol ou plafond amenés à être utilisés à l'intérieur des locaux, ainsi que les produits utilisés pour leur

incorporation ou leur application. Sont ainsi concernés cloisons, revêtements de sol, isolants, peintures, vernis, colles, adhésifs (etc.), dans la mesure où ceux-ci sont destinés à un usage intérieur.

Pour plus d'informations :

□ [www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique Ville durable, aménagement et construction durable > Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Qualité de l'air intérieur > Étiquetage des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration](http://www.developpement-durable.gouv.fr_rubrique_Ville_durable_aménagement_et_construction_durable_Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Qualité_de_l'air_intérieur_Etiquetage_des_émissions_en_polluants_volatils_des_produits_de_construction_et_de_décoration)

□ [www.territoires.gouv.fr_rubrique Bâtiment et construction > Bâtiment et santé > Qualité de l'air intérieur > Étiquetage des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration](http://www.territoires.gouv.fr_rubrique_Bâtiment_et_construction_Bâtiment_et_santé_Qualité_de_l'air_intérieur_Etiquetage_des_émissions_en_polluants_volatils_des_produits_de_construction_et_de_décoration)



Surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public

- Article L. 221-8 du code de l'environnement. Cet article impose aux propriétaires ou exploitants de certains établissements recevant du public une surveillance de la qualité de l'air intérieur de leur établissement. Les modalités de cette surveillance sont définies par décret :
- Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public.
- Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

Valeurs-guides pour l'air intérieur

- Article L. 221-1 du code de l'environnement. Cet article prévoit la définition, par décret, de valeurs-guides pour l'air intérieur.
- Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène.

La surveillance de la qualité de l'air intérieur se met en place progressivement notamment dans les établissements accueillant des enfants^[1].

Elle repose sur :

- une évaluation obligatoire de l'état des moyens d'aération et de ventilation^[2] tous les 7 ans. L'évaluation de l'état des moyens d'aération et de ventilation consiste en un constat de la présence d'ouvrants donnant sur l'extérieur, de leur facilité d'accès et de leur manœuvrabilité ainsi qu'un examen visuel des bouches ou grilles d'aération. Elle est réalisée par les personnes ou organismes mentionnés dans ce même décret, notamment les services techniques de la collectivité

- la réalisation, tous les 7 ans, d'une campagne de mesure de certains polluants (formaldéhyde, benzène, dioxyde de carbone et tétrachloroéthylène si l'établissement est contigu à une installation de nettoyage à sec) qui doit être effectuée par des organismes accrédités.

À défaut de la réalisation de la campagne de mesure, l'établissement peut mettre en place un plan d'actions sur la base d'une évaluation réalisée à partir du guide pratique pour une meilleure qualité de l'air intérieur dans les lieux accueillant des enfants.

Les premières échéances pour la mise en œuvre de cette surveillance sont fixées au 1er janvier 2018 pour les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de 6 ans, les écoles maternelles et les écoles élémentaires puis au 1er janvier 2020 pour les accueils de loisirs, les établissements d'enseignement ou de formation professionnelle du 2nd degré^[3].

A ce jour, des valeurs-guides pour l'air intérieur sont définies^[4] pour le formaldéhyde et le benzène.

La valeur-guide pour le formaldéhyde est fixée pour une exposition de longue durée à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$, elle entrera en vigueur le 1er janvier 2015 et sera abaissée à $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ au 1er janvier 2023.

La valeur-guide pour le benzène est fixée pour une exposition de longue durée à $5 \mu\text{g.m}^{-3}$. Elle est entrée en vigueur le 1er janvier 2013 et sera abaissée à $2 \mu\text{g.m}^{-3}$ au 1er janvier 2016. »

[1] Décret 2011-1728 du 2 décembre 2011 et décret n° 2015-1000 du 17 août 2015

[2] Décret n° 2015-1926 du 30 décembre 2015

[3] Décret n°2012-14 du 5 janvier 2012

[4] Décret 2011-1727 du 2 décembre 2011

Notes



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr / [@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)