

## AVIS TECHNIQUE

Sept.  
2020

# EPURATION DE L'AIR INTERIEUR PAR PHOTOCATALYSE

### Ce qu'il faut retenir

Pour l'ADEME, dans les environnements intérieurs, où l'on passe la plus grande partie de notre temps, la priorité en matière d'amélioration de la qualité de l'air doit être donnée à la prévention de la pollution et à un renouvellement de l'air efficient. Ces actions ont prouvé leur efficacité pour réduire les émissions de polluants et en assurant une ventilation et une aération adaptées. En effet, chacun peut agir pour améliorer la qualité de l'air intérieur. En priorité : (i) opter pour des matériaux et produits les moins émissifs en COV en se référant à l'étiquetage « A+ » indiquant pour certains produits, notamment de construction ou revêtement, que les niveaux de polluants volatils émis sont faibles ; (ii) préférer des produits affichant l'écolabel européen plus respectueux de l'environnement et de la santé ; (iii) ventiler avec un débit d'air adapté aux volumes des pièces de vie ; (iv) faire réaliser la maintenance des appareils de chauffage et des systèmes de ventilation, sans boucher les entrées d'air ; et enfin (v) aérer son intérieur tous les jours au moins dix minutes.

Cependant, dans certaines situations particulières de pollution, ces solutions prioritaires ne sont pas toujours suffisantes : le traitement de l'air peut alors être envisagé en complément. Diverses technologies de traitement de l'air existent sur le marché, dont la photocatalyse. Son principe repose sur l'oxydation catalytique hétérogène photo-activée. Elle a pour objectif d'éliminer des composés organiques volatils (COVs), odorants ou non, ainsi que des composés inorganiques et d'inactiver les micro-organismes. La photocatalyse, mise en œuvre dans diverses applications commercialisées (matériaux ou systèmes d'épuration), est-elle performante et sans danger pour notre santé? La réponse n'est pas unanime d'après plusieurs études portant sur divers matériaux (dits dispositifs « passifs »), des peintures, carrelage, céramique, enduit et lasure, et plusieurs systèmes photocatalytiques (dits systèmes de traitement « actifs ») avec des épurateurs d'air autonomes ou intégrés au système de ventilation.

Grâce à des tests sur banc d'essai (type veine d'air) ou en chambres environnementales (de petit volume ou de taille réelle), plusieurs dispositifs revendiquant une action photocatalytique ont été évalués. Suivant le système testé, la fonction photocatalytique peut clairement être démontrée, avec des performances d'épuration variables selon les polluants et les conditions opératoires, ou bien pas du tout vérifiée pour certains dispositifs. La nature des polluants à traiter est un élément important conditionnant la performance épuratoire. Cependant, la conception des dispositifs de traitement par les fabricants reste cruciale pour une mise en œuvre optimale du procédé photocatalytique. Par ailleurs, plusieurs essais montrent que la performance épuratoire peut diminuer avec le vieillissement des produits photocatalytiques (épurateurs, matériaux « dépolluants »).

L'innocuité du traitement photocatalytique est aussi à vérifier, en termes de : (i) composés gazeux éventuellement formés (sous-produits de dégradation) et potentiellement dangereux pour la santé, et (ii) de particules émises sous forme nanométrique, donc possiblement inhalables, et contenant du dioxyde de titane TiO<sub>2</sub> (classé cancérigène probable pour l'homme par inhalation par le CIRC). Cependant, si la formation de sous-produits d'oxydation potentiellement nocifs a pu être observée avec certains épurateurs, notamment du formaldéhyde, un polluant classé cancérigène certain, les concentrations mesurées restent très faibles dans les ambiances intérieures étudiées. Concernant les particules de TiO<sub>2</sub>, éventuellement émises dans l'air par certains matériaux photocatalytiques commercialisés, la réponse n'est pas homogène, certaines études ayant démontré soit leur absence totale (particules micro et nanométriques) soit leur présence bien quantifiable après une abrasion ou lors d'un nettoyage des surfaces. Néanmoins, des conclusions sanitaires ne peuvent pas être tirées car ces particules n'ont pas été observées sous une forme unitaire inhalable dans les études réalisées.

## Ce qu'il faut retenir (la suite)

Aujourd'hui, la confiance dans les offres diversifiées du marché de la photocatalyse en air intérieur ne peut pas être totalement garantie et généralisée car ce marché reste fortement hétérogène dans la qualité de conception et mise en œuvre des dispositifs de traitement. Si certains produits, mal optimisés parfois dès la conception, montrent une performance épuratoire faible (ou nulle) voire même un potentiel de dangerosité, il est à noter que d'autres matériaux et systèmes d'épuration ont été identifiés comme tout à fait sûrs et performants dans le cadre d'études récentes conduites dans des conditions réalistes. L'ADEME encourage donc les fabricants à faire vérifier leurs systèmes et procédés par le dispositif ETV, dont une partie des frais de vérification est pris en charge. Ainsi, la photocatalyse pourrait éventuellement répondre aux attentes des utilisateurs, dans des situations spécifiques nécessitant un traitement de l'air, sous réserve de confirmation de l'efficacité et de l'innocuité des systèmes, notamment en situations d'évaluations réalistes des milieux intérieurs. Néanmoins, l'ADEME attire l'attention des utilisateurs potentiels sur l'absence de garanties quant à l'efficacité de la plupart des produits commercialisés à ce jour. L'ADEME recommande aux usagers de privilégier surtout une démarche globale et proactive de gestion de la qualité de l'air : d'abord réduire les sources et renouveler l'air, puis si nécessaire, et uniquement en complément, traiter l'air.

### TABLE DES MATIERES

Ce qu'il faut retenir .....	1
Ce qu'il faut retenir (la suite) .....	2
1. Introduction : Contexte & Enjeux .....	3
1.1. Principe technique de la photocatalyse .....	4
1.2. Produits photocatalytiques pour le traitement de l'air .....	5
1.3. Chiffres et caractéristiques clés en photocatalyse .....	6
1.4. Enjeux de la photocatalyse en normalisation .....	6
2. État des connaissances sur la photocatalyse en air intérieur .....	7
2.1. Avantages de la photocatalyse en air intérieur .....	8
2.2. Points de vigilance sur la photocatalyse en air intérieur .....	8
2.3. Des avancées obtenues mais des points à clarifier pour la photocatalyse en air intérieur .....	13
2.4. Méconnaissance des effets sur la santé .....	14
2.5. Consommation énergétique .....	15
2.6. Nécessité d'une certification (ou vérification d'une tierce-partie) des produits .....	15
3. Actions de l'ADEME .....	16
3.1. Recherche .....	16
3.2. Normalisation .....	16
3.3. Certification (ou Vérification tierce-partie) .....	17
4. Conclusions .....	17
Pour en savoir plus .....	19
Remerciements .....	20
Contacts à l'ADEME .....	20
Annexe 1 – Définition et mode de calcul des indicateurs de performance épuratoire (CADR, IP) .....	21
Annexe 2 – Influence de la composition de l'air à traiter (évaluation de la performance par l'IP) .....	22
Annexe 3 – Influence de la composition de l'air à traiter (évaluation de la performance par l'IP) .....	23
Annexe 4 – Influence des systèmes d'épuration (évaluation de la performance par le CADR) .....	24
Annexe 5 – Influence de la composition de l'air (évaluation de la performance CADR et IP) .....	25
Annexe 6 – Influence du vieillissement .....	26

## 1. Introduction : Contexte & Enjeux

Respirer un air de bonne qualité est une préoccupation majeure des Français. Avec un taux élevé de mortalité et de morbidité avérées<sup>1</sup>, la pollution de l'air en France est reconnue comme une urgence sanitaire et se caractérise par une grande diversité de polluants. Selon les environnements et les ambiances (extérieur, intérieur), la nature des polluants peut être spécifique. Malgré une pollution de l'air extérieur globalement en diminution sous l'effet des réglementations notamment, des efforts sont encore nécessaires pour la gestion de la pollution aiguë (dépassements des seuils réglementés en période d'épisodes de pollution) mais surtout de la pollution chronique qui impacte le plus la santé humaine (avec des polluants respirés tout au long de l'année même à des concentrations parfois faibles).

L'air intérieur est souvent plus pollué<sup>2</sup> que l'air extérieur alors même que nous passons la grande majorité de notre temps dans des lieux clos (logements, bureaux, espaces publics en intérieur ou dans les transports). En air intérieur, les sources de pollution peuvent être les matériaux de construction, les mobiliers et éléments de décoration, les produits ménagers, pour ceux qui sont les plus émissifs en composés organiques volatils (COVs), mais aussi certaines pratiques utilisant des produits odorants (ex. encens et bougies parfumées). Dans nos intérieurs, les COVs impactent dans nos intérieurs non seulement la santé humaine mais aussi le confort et la productivité des usagers ([syndrome du bâtiment malsain](#) – *Sick Building Syndrome* en anglais)<sup>3</sup>. Par ailleurs, des polluants caractéristiques d'ambiances extérieures peuvent aussi être observés en air intérieur, comme le benzène, considéré cancérigène certain par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), ou encore l'ozone du fait d'un échange d'air permanent entre l'environnement extérieur et les espaces intérieurs. Hormis les produits commercialisés avec l'étiquetage<sup>4</sup> « A+ en COV », donnant une information sur des niveaux d'émissions limités en composés organiques volatils, d'autres produits du quotidien peuvent émettre en quantités plus importantes des COVs, tels que des composés carbonylés (formaldéhyde, acétaldéhyde), aromatiques (toluène) ou aliphatiques (heptane). Par exemple, les désodorisants, les encens ou les bougies parfumées (revendiquant pourtant parfois « assainir l'air ») émettent fortement des COVs (du benzène surtout dans le cas de l'encens). Certains matériaux de décoration ou de construction comme des vernis, des laines de verre et des revêtements de sol peuvent aussi émettre du formaldéhyde, un autre composé volatil classé cancérigène. La pollution de l'air intérieur est résolument un enjeu majeur de santé publique, dont le coût économique de l'inaction est estimé<sup>5</sup> en France à 19 milliards d'euros par an.

Si la limitation des émissions de polluants et le renouvellement de l'air dans les locaux sont des paramètres clés, cela peut ne pas être toujours suffisant pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur dans certaines situations spécifiques. En environnements intérieurs particulièrement pollués, le traitement de l'air selon divers procédés peut permettre de baisser les niveaux de polluants particuliers ou gazeux. Plusieurs techniques d'épuration<sup>6</sup> se partagent aujourd'hui un marché concurrentiel et porteur dans le domaine du traitement de l'air. Pour capter les particules, la filtration mécanique dans un matériau fibreux est la technique la plus répandue mais d'autres techniques sont possibles par

<sup>1</sup> [Poids sanitaire \(« fardeau de morbidité »\)](#) estimé en France pour les particules fines PM<sub>2,5</sub> en lien avec les activités humaines, soit 9 % de la mortalité en France continentale et une perte d'espérance de vie à 30 ans pouvant dépasser deux ans dans les villes les plus exposées (c.-à-d. en agglomération de plus de 100 000 habitants mais aussi dans les villes moyennes et petites, et en milieu rural). <http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2016/Impacts-de-l-exposition-chronique-aux-particules-fines-sur-la-mortalite-en-France-continentale-et-analyse-des-gains-en-sante-de-plusieurs-scenarios-de-reduction-de-la-pollution-atmospherique>

<sup>2</sup> OQAI – Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur -, 2007. Campagne nationale Logements : état de la qualité de l'air dans les logements français. [Rapport final](#), 183 pages. [http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document\\_133.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document_133.pdf) / Dossier de presse - 21 novembre 2006, Etat de la qualité de l'air dans les logements français [http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document\\_142.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document_142.pdf) et [http://www.oqai.fr/userdata/documents/212\\_dossier\\_de\\_presse\\_15122003.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/212_dossier_de_presse_15122003.pdf)

<sup>3</sup> Perdrix, S. Parat, S. Liaudy, A. Maitre, Syndrome des bâtiments malsains (SBM), Rev. Fr. Lab. 373 (2005) 67-72.

<sup>4</sup> [Décret n° 2011-321 du 23 mars 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. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000023759679&categorieLien=id> (voir la version en vigueur). L'étiquetage indique le niveau d'émission de COVs entre « A+ » (le produit émet très peu ou pas du tout) à « C » (le produit émet beaucoup).

<sup>5</sup> Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire

<sup>6</sup> Technologies d'épuration de l'air : filtration mécanique ou électrostatique des particules, filtration moléculaire, plasma froid, ozonation, ionisation et photocatalyse)

ionisation ou précipitation électrostatique. Pour capter et/ou dégrader les COVs, des solutions spécifiques sont développées, soit par des procédés dits récupératifs (avec des adsorbants à base de polymère, zéolithe ou charbon actif), soit par des procédés d'oxydation, dits destructifs, où l'énergie nécessaire à l'activation du processus est thermique ou bien radiative (soit catalytique, soit photocatalytique avec son procédé d'oxydation activé en présence de lumière).

Les techniques proposées, en air intérieur notamment, peuvent présenter certains avantages (dépollution, auto-nettoyage, maintenance simplifiée) mais aussi des inconvénients (innocuité, performance non avérée, coût, consommation énergétique, durée de vie non évaluée ou limitée des systèmes). Si certaines de ces techniques (filtration mécanique, adsorption moléculaire) sont éprouvées et bénéficient de retours d'expérience plutôt positifs en terme de performance et d'innocuité, d'autres posent question en revanche (photocatalyse, plasma froid, ionisation,...). En effet, les études disponibles sur ces techniques peuvent conduire à des résultats contradictoires et les questions restent posées traduisant un besoin d'approfondissement des connaissances. L'ADEME s'est particulièrement intéressée à la photocatalyse et a soutenu ces dernières années des recherches dans ce domaine du fait d'un développement commercial de ces produits photocatalytiques et de leur recensement sur le marché du traitement de l'air.

D'abord développée et utilisée avec succès pour le traitement de l'eau<sup>7,8</sup>, **la photocatalyse montre aussi un potentiel pour traiter l'air** des effluents industriels (depuis les années 90<sup>9</sup>) et des milieux intérieurs résidentiels (depuis les années 2000). Cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches basées sur des essais réalisés en laboratoire, essentiellement à échelle réduite. Dans le domaine du traitement de l'air, les fournisseurs de produits issus de la photocatalyse revendiquent une fonction dépolluante ciblant généralement un polluant, plus rarement un mélange de polluants.

**Mais la photocatalyse est-elle véritablement efficace pour améliorer la qualité de l'air et sans danger ?**

Pour l'utilisateur, la question principale est de savoir si cette propriété dite « dépolluante » (pour l'abattement de COVs principalement) est confirmée dans des conditions d'usages réalistes<sup>10</sup>, notamment en air intérieur, et si l'innocuité est aussi vérifiée pour tous les dispositifs photocatalytiques commercialisés (matériaux dits passifs et systèmes de traitement dits actifs), c'est-à-dire sans formation de sous-produits de dégradation ni émissions de nanoparticules.

Grâce à des travaux de recherche, basés sur plusieurs résultats d'études et de thèses, récemment menés en France et apportant des connaissances nouvelles sur les performances et l'innocuité de plusieurs systèmes photocatalytiques (épuration d'air autonomes [1,2,3], systèmes d'épuration intégrés dans le réseau de ventilation [4,5]) et matériaux photocatalytiques [1,6,7,8] représentatifs du marché, **l'ADEME peut apporter dans cette fiche technique son analyse critique sur le sujet du traitement de l'air intérieur par photocatalyse**. Ce document permet ainsi, d'une part d'actualiser la position de l'ADEME sur l'épuration de l'air par photocatalyse<sup>11</sup> **en ciblant l'environnement intérieur** et, d'autre part de préciser et compléter certaines des conclusions issues de l'auto-saisine de l'ANSES n°212-SA-0236<sup>12</sup>, publiée en 2017, sur la technologie de la photocatalyse en particulier.

## 1.1. Principe technique de la photocatalyse

Découverte en 1967 au Japon, la photocatalyse est un procédé de catalyse hétérogène qui permet l'oxydation de composés gazeux, principalement des composés organiques volatils, potentiellement jusqu'à leur minéralisation. Ce procédé peut agir également comme germicide. Cette technique permet en effet d'inactiver les micro-organismes et d'éliminer les COVs, odorants ou non, mais aussi d'autres composés gazeux inorganiques, comme les oxydes d'azote ou l'ozone. En présence d'oxygène et de

<sup>7</sup> Barbeni M., Pramauro E., Pelizzetti, Borgarello N., Serpone N. 1985. Photodegradation of pentachlorophenol catalyzed by semiconductor particles. *Chemosphere* 14, 195.

<sup>8</sup> Herrmann J.- M., Guillard C., Pichat P. 1993. Heterogeneous photocatalysis : an emerging technology for water treatment. *Catalysis Today* 17(1-2), 7-20.

<sup>9</sup> Pichat P., Disdier C., Hoang-Van C., Mas D., Goutailler G., Gaysse C. 2000. *Purification/desodorization of indoor air and gaseous effluents by TiO<sub>2</sub> photocatalysis*. *Catalysis Today*, 63, 363-369.

<sup>10</sup> c'est-à-dire, qui vont au-delà des conditions proposées dans la norme XP B44 013, basée sur des tests de faible volume, pour viser des conditions de tests plus réalistes avec des grands volumes à traiter.

<sup>11</sup> Fiche technique ADEME précédente publiée [en 2013](#)

<sup>12</sup> [Saisine ANSES en 2017](#) sur l'identification et l'analyse de différentes techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf> (techniques de piégeage ou techniques d'oxydation (destructives) dont la photocatalyse)

vapeur d'eau, un rayonnement ultra-violet émis par une source adaptée (naturelle/solaire ou artificielle/lampe) peut activer le catalyseur<sup>13</sup> (se composant généralement de dioxyde de titane sous forme nanométrique) en assurant la décomposition des molécules adsorbées à sa surface en dioxyde de carbone et vapeur d'eau, lorsqu'il s'agit de polluants hydrocarbonés, après une série de réactions d'oxydation (Figure 1).

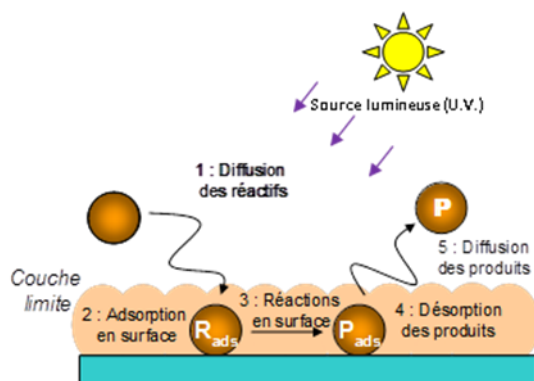


Figure 1 : Schéma du principe de la photocatalyse (description détaillée<sup>14</sup>)

## 1.2. Produits photocatalytiques pour le traitement de l'air

Dans les années 90, des publications et quelques applications commencent à voir le jour, en particulier dans le développement de matériaux autonettoyants. Puis au début des années 2000, l'offre photocatalytique s'oriente majoritairement vers des solutions techniques destinées au marché de l'air intérieur.

Deux grandes familles de produits sont commercialisées pour l'épuration de l'air par photocatalyse :

- ✓ **Les épurateurs d'air autonomes**, appelés aussi systèmes photocatalytiques actifs, intégrant un ventilateur<sup>15</sup>. Ils sont surtout dédiés à l'épuration de l'air intérieur, pouvant être de types mobiles (unités autonomes), fixes (systèmes plafonniers ou consoles murales) ou intégrés au réseau de chauffage, ventilation et climatisation des bâtiments (systèmes CVC) ;
- ✓ **Les matériaux** dits « dépolluants », appelés aussi matériaux photocatalytiques passifs, sont représentés par une large gamme de produits, en intérieur (peintures de décoration, carrelages, revêtements de plaques ou de dalles) et en extérieur (bétons, ciments, enduits, céramiques, verres auto-nettoyants, peintures, bitumes...).

Dans le domaine du traitement de l'air intérieur, une étude<sup>16</sup> réalisée en 2012 par le CSTB, pour le compte de l'ADEME, a permis de recenser en France jusqu'à 12 types de matériaux photocatalytiques contenant du TiO<sub>2</sub> particulaire et revendiquant une fonction dépolluante. Dans le domaine du traitement de l'air extérieur, une autre étude<sup>17</sup> réalisée par l'IRCELYON en 2011, pour le compte de l'ADEME, a analysé la bibliographie et a répertorié de manière exhaustive les matériaux photocatalytiques commercialisés en France. Plus récemment, en 2017, une saisine<sup>18</sup> de l'ANSES a identifié jusqu'à 70 références de produits

<sup>13</sup> Si le catalyseur (ou matériau semi-conducteur) utilisé dans les produits photocatalytiques est majoritairement du dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>), sous une forme nanométrique, on trouve aussi des semi-conducteurs à base d'oxyde de zinc (ZnO), d'oxyde ferreux (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), d'oxyde de tungstène (WO<sub>3</sub>) et de séléniure de cadmium (CdSe). Le TiO<sub>2</sub> est très répandu du fait de son faible coût, de sa durabilité et de sa facilité de mise en œuvre.

<sup>14</sup> Avec une énergie lumineuse suffisante, fournie par un rayonnement dont les longueurs d'ondes s'étendent du domaine des ultraviolets (~300-250 nm) jusqu'à la limite de la lumière visible (~400 nm), les électrons migrent à la surface du matériau photocatalytique de la bande de valence vers la bande de conduction, créant une paire électron/trou (e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) capable de réagir avec les composés, tels que l'oxygène et la vapeur d'eau, adsorbés à la surface du semi-conducteur activé, et ainsi former des radicaux hydroxyles et des ions peroxydes qui sont des espèces oxygénées très réactives, lesquelles oxydent ensuite les composés organiques (adsorbés également à la surface du catalyseur) jusqu'à leur minéralisation totale conduisant à du dioxyde de carbone et de l'eau.

<sup>15</sup> Un ventilateur prélève l'air (pollué) dans la pièce, l'apporte jusqu'au procédé photocatalytique et le restitue (épuré) à l'ambiance de la pièce.

<sup>16</sup> Delaby S. et Nicolas M. 2012. Impact des matériaux photocatalytiques sur les polluants chimiques et microbiens des environnements intérieurs. Rapport ADEME (convention n°1062c0024), 70 pages

<sup>17</sup> Puzenat E., Hermann J.M. et Guillard C. 2011. Matériaux photocatalytiques pour le traitement de l'air extérieur. Rapport ADEME (convention n°1062c0029), 37 pages.

<sup>18</sup> [Saisine ANSES en 2017](https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf) sur l'identification et l'analyse de différentes techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes

revendiquant une technologie photocatalytique ce qui est assez peu par rapport à d'autres technologies de l'épuration de l'air intérieur (ex. ~220 pour la filtration mécanique ou près de 200 pour l'ionisation).

### 1.3. Chiffres et caractéristiques clés en photocatalyse

Le marché de la photocatalyse est toujours émergent, tant au niveau national, qu'européen ou mondial. Estimé à environ 1 milliard d'euros environ à l'échelle mondiale, dont l'essentiel concerne des applications de dépollution de l'air extérieur. Près de 86 % du marché mondial du traitement de l'air par photocatalyse est réalisé dans le secteur de la construction, 17 % réalisé pour les biens de consommation et 4 % pour l'environnement. Pour le marché européen, le potentiel de développement de la photocatalyse est estimé à quelques centaines de millions d'euros (équivalent à un quart du marché mondial).

Les applications photocatalytiques pour le traitement de l'air intérieur commercialisées en occident sont encore très marginales au regard d'autres marchés, américain et asiatique, avec un chiffre d'affaires de 8 milliards de dollars en 2016. En France, le marché de l'épuration de l'air intérieur (toutes technologies confondues) est estimé à environ 170 millions d'euros par an, sachant que la technique de la photocatalyse représenterait 17 %<sup>19</sup> seulement des références de produits (par comparaison, la filtration mécanique ou l'ionisation sont deux fois plus référencées dans les produits commercialisés). Avec une perspective de croissance de 10 à 15 % par an, le marché chinois du traitement de l'air intérieur est particulièrement attractif. Le marché indien est aussi très prometteur pour le développement de produits photocatalytiques. Les perspectives d'évolution montrent que le secteur de la construction maintiendrait son développement et serait majeur dans les applications photocatalytiques.

Pour les épurateurs d'air, ni les prix<sup>20</sup> affichés, ni les allégations des fabricants sur leurs systèmes ne peuvent permettre aux consommateurs potentiels de pouvoir préjuger d'une réelle performance ou d'une innocuité (NB : le produit le plus cher n'est pas nécessairement le plus efficace et le plus sûr, et certaines allégations ou revendications ne sont pas toujours garantes d'informations crédibles). La seule certitude possible pour les consommateurs devrait être la vérification de ces systèmes revendiqués comme « dépolluant l'air », une vérification basée sur des tests normalisés avec des résultats avérés lors d'une certification ou d'une vérification environnementale (en savoir plus au point 2.5).

**Choisir un produit photocatalytique avec discernement, est-ce vraiment possible avec une offre commerciale très hétérogène ? Peut-on privilégier des caractéristiques techniques photocatalytiques pour un système de traitement de l'air ou un matériau dépolluant car plus favorables à la performance épuratoire et/ou à l'innocuité ? Cette fiche technique ADEME propose quelques éléments de réflexion.**

### 1.4. Enjeux de la photocatalyse en normalisation

En France, le marché de la photocatalyse n'est pas suffisamment mature et structuré. Pourtant, la normalisation (AFNOR notamment) peut contribuer à la promotion du savoir-faire des entreprises du domaine du traitement de l'air par photocatalyse. Le référentiel normatif<sup>21</sup> peut aider à augmenter la confiance des usagers finaux et guider leurs choix vers des appareils ou matériaux du marché de la photocatalyse dont la diffusion reste plutôt limitée du fait d'un nombre restreint de méthodes d'essais, spécifiques et normalisées, pour les caractériser.

La commission AFNOR B44A « Photocatalyse » (CN B44A)<sup>22</sup> élabore des normes françaises, dont la finalité est d'être présentées au niveau européen (CEN<sup>23</sup>) et international (ISO<sup>24</sup>). Cette instance

<sup>19</sup> [Saisine ANSES de 2017](https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf) sur l'identification et l'analyse de cinq techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes (techniques de piégeage ou techniques d'oxydation (destructives) dont la photocatalyse) <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf>

<sup>20</sup> Le prix d'achat des épurateurs d'air autonomes se situe dans une fourchette de 200 à 2 000 €.

<sup>21</sup> Un référentiel normatif permet de rassembler un ensemble d'acteurs : producteurs de media, distributeurs ou fabricants de lampes, fabricants de purificateurs et de réacteurs, laboratoires d'analyse, industriels, utilisateurs finaux, laboratoires de recherche et d'analyse, centres techniques ou de recherche.

<sup>22</sup> La commission AFNOR B44A, créée en 2007, assure pour la France le suivi des travaux Européens CEN (CEN/TC 386 « Photocatalyse ») et internationaux ISO (ISO/TC 206/WG 9 « Photocatalyse »).

<sup>23</sup> Comité Européen de Normalisation. Le CEN/TC 386 « Photocatalyse », créé en 2008, est en charge de la normalisation de la terminologie, des méthodes d'essais et des tests de performance pour la caractérisation photocatalytique.

<sup>24</sup> Organisation Internationale de normalisation. Les normes développées par l'ISO/TC 206/WG 9 sont des normes sur les matériaux et sont complémentaires des normes de performance développées par le CEN/TC 386

française normative AFNOR (B44A) participe également à l'augmentation de la compétitivité des produits du marché de la photocatalyse.

Compte-tenu des multiples applications de la photocatalyse sur le marché mondial et français, le contexte normatif vise des domaines sur :

- La purification de l'air (des oxydes d'azote, des COVs, des micro-organismes, des odeurs) ;
- La purification de l'eau (potabilisation, détoxification d'eaux de rinçage industrielles et agricoles, décoloration d'effluents aqueux) ;
- Le nettoyage de surface (dit « self cleaning ») pour diverses applications (textiles, verres, métaux, bétons, ciments) ;
- Les applications médicales ;
- Les effets sanitaires des sources lumineuses, des nouvelles technologies ou encore de la microbiologie.

En France, issues principalement de la CN B44A, **trois normes sont dédiées à la photocatalyse** (pour des épurateurs d'air et matériaux), avec des essais à réaliser en enceinte de faible volume (1m<sup>3</sup>) ou de volume non spécifié ou en conduit d'air :

- La norme européenne **NF EN 16846-1** « *Photocatalyse - Mesure de l'efficacité des dispositifs photocatalytiques servant à l'élimination, en mode actif, des COVs et des odeurs dans l'air intérieur - Partie 1 : Méthode d'essai en enceinte confinée* », issue de l'ancienne norme française expérimentale XP B44-013 de 2009 (basée sur des essais inter-laboratoires menés en 2008) et portée avec succès au niveau européen en 2017. Les projets cités dans cette fiche (notés dans « Pour en savoir plus ») s'appuient pour la plupart sur des tests réalisés avec l'ancienne norme (XP B44-013) ;
- La norme française sur les épurateurs d'air intérieurs individuels grand public (tout type d'épurateur et pas uniquement photocatalytique) désignée par **NF B44-200** « *Épurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles – Méthodes d'essai et performances intrinsèques* », publiée en 2016, qui a donné lieu notamment à un référentiel de certification pour les épurateurs d'air ;
- La norme française **XP CEN/TS 16980-1** portant sur la « *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* », issue de l'ancienne norme expérimentale XP B44-011 de 2009 portée au niveau européen en 2017 et qui est en cours de conversion en norme européenne (à prévoir en 2020/2021 la publication en NF EN).

Des travaux de recherche peuvent conduire, le cas échéant, à la mise en place d'une normalisation. Deux études<sup>25</sup> et <sup>26</sup> ont permis d'initier en France l'élaboration de la norme NF B44-200. Enfin, une autre commission AFNOR « Céramiques techniques » a également publié plusieurs normes<sup>27</sup> sur les matériaux photocatalytiques semi-conducteurs pour la purification de l'air, en incluant l'élimination des COVs.

## 2. État des connaissances sur la photocatalyse en air intérieur

Si des expérimentations de dépollution en air extérieur, menées grandeur nature, sur des revêtements de bâtiment<sup>28</sup> ou de route<sup>29</sup> (matériaux photoactifs : mortiers et ciments) ont montré une réduction des concentrations de NOx entre 40 à 57 % (à proximité immédiate des zones où sont utilisés ces matériaux), **l'objectif principal de cette fiche technique ADEME est d'actualiser les connaissances dans le traitement de l'air intérieur en conditions réalistes des milieux intérieurs.**

<sup>25</sup> Rapport « Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration d'air », mai 2006 (convention ADEME N°0404C0080).

<sup>26</sup> Rapport CETIAT « Développement d'une méthode d'essais des épurateurs d'air », Janvier 2010 (Convention ADEME n° 0604C0082).

<sup>27</sup> NF ISO 18562-1, ISO 22197-1, NF ISO 22197-2 à 5, NF ISO 22197-2, NF ISO 22197-3, NF ISO 22197-4, NF ISO 22197-5.

<sup>28</sup> [www.picada-project.com](http://www.picada-project.com)

<sup>29</sup> Rapport ADEME. 2011. Impacts des aménagements routiers sur la pollution atmosphérique

## 2.1. Avantages de la photocatalyse en air intérieur

**Élimination de micro-organismes et dégradation de certains polluants (avec formation transitoire de polluants secondaires)**

La photocatalyse permet, sous certaines conditions, d'éliminer certains COVs et aussi d'inactiver les micro-organismes. Ces derniers résident à la surface du semi-conducteur et auront leur reproduction soit bloquée (effet bactériostatique), soit ils seront tués (effet bactéricide). D'après des tests (réalisés en laboratoire en enceinte de faible volume) et les normes appliquées<sup>30</sup>, des taux d'abattement significatifs de COVs ont été démontrés pour certains des épurateurs d'air autonomes testés<sup>31</sup> [1]. Dans quelques cas, avec une fonction photocatalytique vérifiée, une production de formaldéhyde<sup>32</sup> (voire de l'acétaldéhyde) peut être observée mais les quantités formées restent faibles (avec moins de 20 ppbV, ces sous-produits d'oxydation transitoires sont éliminés à la fin d'un cycle photocatalytique complet). De plus des expériences menées en laboratoire avec des peintures photocatalytiques non commercialisées ont montré une efficacité mesurable pour l'élimination du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), jusqu'à quatre fois plus importante par rapport à une peinture standard [8].

**Minéralisation du polluant (si dégradation complète après une série de réactions d'oxydation photocatalytique)**

Un COV (constituée d'un nombre<sup>33</sup> d'atomes de carbone C), dégradé complètement par photocatalyse, va former en fin de processus des molécules de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) avec un nombre équivalent d'atomes de carbone (C). C'est le principe de la minéralisation. La mesure du CO<sub>2</sub> au cours du processus de photo-oxydation est un indicateur pertinent pour mettre en évidence l'avancement de la réaction d'oxydation. Du CO<sub>2</sub> formé par des systèmes ou matériaux en fonctionnement atteste ainsi d'une fonction photocatalytique. Selon des situations testées (nature de l'effluent traité ou problème de dimensionnement du procédé) les processus d'oxydation peuvent ne pas aboutir à une production de CO<sub>2</sub> formé équivalente aux C initiaux. Cela ne signifie pas pour autant que la fonction photocatalytique n'est pas active mais que la minéralisation n'est pas complète.

**Débit d'air épuré : paramètre retenu dans les normes actuelles pour évaluer la performance des épurateurs d'air**

Le débit d'air épuré (CADR –Annexe 1) est un indicateur utile pour évaluer le niveau de performance épuratoire d'un système actif de traitement de l'air en conditions de test normatif, y compris par photocatalyse (c'est-à-dire, avec les normes actuelles, sur banc d'essai de type veine d'air ou en enceinte contrôlée de volume faible ou de volume non spécifié).

## 2.2. Points de vigilance sur la photocatalyse en air intérieur

**Des écarts de performance parfois importants selon les mélanges de polluants ou les débits d'air testés... avec d'éventuelles productions de COVs permanentes... et une fonction photocatalytique non démontrée pour certains systèmes et matériaux.**

Sur des systèmes de ventilation équipés d'un média photocatalytique<sup>34</sup> ou avec certains épurateurs d'air autonomes et matériaux photo-actifs, des expérimentations réalisées en laboratoire, principalement en enceinte de faible volume, ont montré des performances d'abattements de polluants très contrastées, selon les COVs testés. Pour certains épurateurs en fonctionnement, on constate qu'aucune fonction photocatalytique dite « avérée » n'a pu être mise en évidence puisqu'aucun abattement de COVs n'est observé ni de production de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>O. C'est également le cas pour certains matériaux, dont l'efficacité épuratoire est peu significative. Des simulations numériques d'écoulements d'air et de polluants à l'intérieur d'une pièce équipée de peintures photo-actives ont permis de montrer qu'un

<sup>30</sup> La norme XP B44-013 via ajout de polluants en une fois, et la norme XP B44-200 via ajout de polluants en continu

<sup>31</sup> Systèmes E15 et E8, observés en fonctionnement dans le projet SafePHOTOCAT, ont été évalués comme les plus performants en conditions contrôlées au laboratoire [1].

<sup>32</sup> Observé pour le système E15 jugé comme le plus performant des systèmes testés dans le projet SafePHOTOCAT, y compris pour les expérimentations en simulation de conditions réelles [1].

<sup>33</sup>  $C \text{ (mg m}^{-3}\text{)} = (n_C \times M_C) \times C_{ppbv}/V_m$  avec  $n_C$  : nombre de carbone du COV considéré,  $M_C = 12 \text{ g mol}^{-1}$ , masse molaire du carbone et  $V_m$  volume molaire du composé en phase gazeuse ( $24 \text{ L mol}^{-1}$ ).

<sup>34</sup> Hodgson et al., 2005. Evaluation of ultra-violet photocatalytic oxidation (UVPCO) for indoor air applications : conversion of volatile organic compounds at low part-per-billion concentrations



manque de contact entre le polluant et le media photocatalytique pouvait expliquer ces limitations. L'adsorption des polluants pouvant être par exemple insuffisante sur le matériau). Pour des matériaux photocatalytiques de type peinture, enduits, lasures et céramique, un effet photocatalytique relativement faible a été démontré en condition d'éclairage réaliste pour un environnement intérieur. Il s'avère pour ces essais que les COVs étaient davantage adsorbés (fixés au support) que dégradés (par le procédé photocatalytique) [6]. Rappelons que des polluants adsorbés peuvent être réémis dans l'air (phénomène de désorption) puisqu'ils ne sont pas nécessairement piégés durablement. À ces constats s'ajoute le fait que le rendement épuratoire du photocatalyseur décroît souvent avec le temps. Enfin, la photocatalyse peut avoir des effets non désirés sur la matrice hôte des particules de TiO<sub>2</sub>, en affectant les propriétés mécaniques (résistance, texture, etc... par exemple dans les peintures) par oxydation de leurs matrices organiques, conduisant à la formation d'autres COVs.

***Une efficacité d'épuration à vérifier en conditions d'utilisation réalistes pour conforter les résultats des premiers tests menés en enceintes de grand volume avec plusieurs dispositifs ou matériaux (pour ceux qui sont identifiés comme performants dans un faible volume d'air à traiter et n'induisant pas de formation durable de sous-produits d'oxydation) ...***

Il est important de prouver la performance épuratoire (et l'innocuité) des dispositifs dans l'environnement dans lequel ils sont mis en œuvre. En effet, l'efficacité de certains produits photocatalytiques à abattre des polluants primaires dans certaines conditions contrôlées<sup>35</sup> (volume d'air, éclairage) n'est pas nécessairement confirmée en situations réalistes<sup>36</sup>. Très peu d'études sur la photocatalyse testent des usages réalistes [1, 2, 3]. Il est à souligner que certains essais approfondis en chambre expérimentale de grand volume (de 40 m<sup>3</sup>) ont été réalisés sur plusieurs épurateurs d'air autonomes dont la fonction photocatalytique a été démontrée selon les normes actuelles [2,3]. Les performances épuratoires sont plutôt contrastées selon les systèmes actifs photocatalytiques considérés et les polluants à traiter (Annexe 2 -Figure 2 ; Annexe 3 -Figure 3). Deux études ont permis de tester quatre épurateurs d'air autonomes (désignés par S-1, S-2, S-3, S-4), en laboratoire et en conditions réalistes (pièce de 40 m<sup>3</sup>) [2,3]. Un seul (Système S-1) était toujours performant en situations réalistes (pour un volume d'air de 40 m<sup>3</sup>), alors qu'un deuxième (Système S-2) n'était performant que dans le cas d'un volume d'air plus faible de 1 m<sup>3</sup> (performance vérifiée selon la norme NF EN 16846-1 / désignée par XP B44-013 au moment de l'étude). Ainsi, dans les conditions réalistes étudiées, le Système-2 montre une faible capacité à traiter de l'air pollué dans une pièce de taille réelle. Il conduit à la formation de formaldéhyde et d'acétaldéhyde qui sont des polluants ciblés dans les espaces intérieurs. Il est apparu au cours des essais qu'une optimisation des paramètres procédés liés à la conception du Système S-2 aurait pu permettre d'accroître ses performances.

***La photocatalyse est dépendante de nombreux paramètres qu'il s'agit de mieux caractériser ...***

Étant donné les nombreux paramètres influençant l'efficacité d'un procédé de dégradation par photocatalyse, il est assez difficile de prédire, en toutes circonstances et sans incertitudes, les performances des systèmes ou matériaux photocatalytiques. Les points de vigilance qui permettent d'avoir un regard critique sur un procédé photocatalytique sont néanmoins identifiés à présent :

- **La nature des polluants primaires à éliminer** (gaz ou microorganismes en injection individuelle ou en mélange) :

En essai au laboratoire (injection individuelle de COV et enceinte de faible volume), un épurateur d'air autonome peut être performant vis-à-vis d'un COV spécifique à éliminer et en revanche ne montrer aucune performance épuratoire pour un COV différent. Par exemple, dans les Figures 4 et 5, les débits d'air épuré (CADR) pour six épurateurs d'air autonomes<sup>37</sup> montrent des abattements variables suivant le COV par un même épurateur (Annexe 4) : avec le système E15, l'abattement observé est significatif pour l'heptane et l'acétaldéhyde alors que le système S1 est performant uniquement pour éliminer

<sup>35</sup> C'est-à-dire au laboratoire dans une enceinte de faible volume en général (cas des dispositifs de traitement actif) ou en présence d'éclairages non représentatifs de sources réelles de lumière (cas des matériaux photocatalytiques)

<sup>36</sup> C'est-à-dire dans des conditions de chambre expérimentale en grand volume (simulant une pièce de vie standard –cas des épurateurs) ou en présence de sources d'irradiation classiquement utilisées en éclairage (cas des matériaux passifs pour l'activation de leurs surfaces)

<sup>37</sup> Epurateurs testés neufs et avec une fonction photocatalytique avérée (E8, E15 du projet SafePHOTOCAT [1] ; S1, S2, S3, S4 du projet ETAPE [2])

l'acétaldéhyde [1,2]. Si l'efficacité épuratoire (testée avec la norme XP B44 013 à la date des études) est intéressante pour l'acétaldéhyde avec trois dispositifs (notés E8, E15, S1), un seul de ces dispositifs (E15) est aussi significativement performant pour l'heptane [1,2]. Avec un autre exemple, cette fois pour des microorganismes et un système photocatalytique d'épuration de type CVC (c'est-à-dire, installé dans un réseau de ventilation), l'efficacité d'abattement est également très contrastée [4] : 100 % d'efficacité sur les bactéries (*Staphylococcus epidermis*) mais ce résultat s'explique principalement par l'effet germicide des lampes UVC et non par une action photocatalytique du système testé, et par contre une performance épuratoire nulle sur les champignons (*Aspergillus brasiliensis*).

Un épurateur d'air autonome qui est vérifié performant (d'après le CADR -Figure 6 : en enceinte de faible volume, ~ 1m<sup>3</sup>), capable d'abattre un polluant spécifique mesuré au sein d'une matrice gazeuse type – constituée de plusieurs COVs – peut voir sa performance chuter pour ce même polluant mesuré cette fois dans une matrice gazeuse différente – c'est-à-dire avec d'autres COVs (Annexe 5). Il est donc très important de caractériser la diversité des COVs, présents dans l'espace intérieur dans lequel le dispositif sera mis en œuvre, car la nature des polluants influence directement leurs taux d'élimination et par conséquent l'efficacité globale d'un système photocatalytique. Dans le cas du système S1 (testé dans les conditions du projet ETAPE), le débit d'air épuré (CADR) pour le formaldéhyde (polluant mesuré) est plus élevé dans une matrice gazeuse de type « standard<sup>38</sup> », c'est-à-dire constituée de 5 COVs classiques en air intérieur (acétaldéhyde, acétone, heptane, toluène et formaldéhyde). Par contre comme indiqué à la Figure 6 en Annexe 5, lorsque le formaldéhyde est intégré à d'autres matrices gazeuses caractérisant des ambiances intérieures différentes (« urbaine<sup>39</sup> », « bâtiment bois<sup>40</sup> » ou « hospitalier<sup>41</sup> ») les débits d'air épuré (CADR) du formaldéhyde sont plus faibles, variant entre 40 % et 90 % par rapport au CADR le plus élevé calculé avec la matrice « standard » [2]. La Figure 6 montre que l'on peut hiérarchiser du plus performant au moins performant un système photocatalytique selon le type d'ambiance intérieure, quelle que soit l'indicateur considéré : CADR ou IP (Annexes 1 et 5).

Enfin, un autre point de vigilance est à souligner sur la présence de particules lors d'essais d'évaluation de la performance épuratoire. Du fait de leur possible interaction avec le media photocatalytique, cela pourrait influencer une moindre capacité du procédé à éliminer les molécules gazeuses (COV avec un processus complet de photocatalyse) [5].

#### ➤ Une production potentielle de polluants secondaires :

En aval du système photocatalytique (après traitement), les concentrations d'un polluant donné peuvent être supérieures à sa concentration initiale<sup>42</sup> : comme observé pour un système d'épuration commercialisé (dit CVC) installé en laboratoire dans un réseau de ventilation, et ceci quelles que soient les configurations d'essais, lampe allumée ou éteinte [4]. En définitive, cette étude a démontré que la fonction photocatalytique du système CVC étudié n'avait pas conduit à une performance épuratoire optimisée puisque des concentrations supplémentaires de COVs ont été générées (acétaldéhyde, acétone, heptane et toluène –d'après la norme XP B44-200- et aussi du formaldéhyde ajouté). Dans une autre étude, cette fois un prototype photocatalytique intégré dans la gaine de ventilation d'un bâtiment existant, le même phénomène en sortie de système a été observé avec la formation de composés gazeux à chaîne carbonée plus courte et oxygénée, tels que le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le propanal ou le butanal [5]. Enfin, dans d'autres applications photocatalytiques, il peut en être de même puisque des concentrations significatives de COVs, jusqu'à plusieurs centaines de ppbV (acétaldéhyde, acétone, t-butanol), ont été mesurées en aval de certains épurateurs d'air autonomes testés dans les conditions du projet SafePHOTOCAT (systèmes E1 et E10 testés en fonctionnement et en absence de polluants initiaux, c'est-à-dire sans COVs primaires ajoutés dans l'air) [1]. Ces phénomènes traduisent un processus d'oxydation incomplet par les systèmes conduisant à l'émission de COVs (principalement des sous-

<sup>38</sup> Matrice « Air intérieur standard » : mélange en concentrations typiques de COVlégers (acétaldéhyde, acétone et heptane) avec du toluène, soit les 4 COVs testés dans la norme NF EN 16846-1, mais en ajoutant aussi du formaldéhyde [2].

<sup>39</sup> Matrice « Air intérieur zone urbaine » est un mélange en concentrations typiques de COVlégers (acétaldéhyde et heptane) avec du toluène en ajoutant des substances classiquement rencontrées en milieu urbain (benzène, 2-pentène), et en complétant avec du formaldéhyde

<sup>40</sup> Matrice « Air intérieur bâtiment bois » est un mélange en concentrations typiques de COVlégers (acétaldéhyde et acétone) avec du toluène en complétant avec une substance caractéristique de milieu intérieur en présence de bois ( $\alpha$ -pinène) et en ajoutant aussi du formaldéhyde

<sup>41</sup> Matrice « Air intérieur hospitalier » est un mélange en concentrations typiques de COVlégers (acétaldéhyde et acétone) avec du toluène en complétant avec une substance organique fortement halogénée caractéristique de milieu hospitalier (dans les gaz anesthésiants) et en ajoutant aussi du formaldéhyde

<sup>42</sup> C'est-à-dire, si des concentrations de polluants sont ajoutées en amont du système

produits organiques oxygénés). Dans ce cas, c'est souvent la mise en œuvre, la nature des matériaux utilisés et le dimensionnement des dispositifs photocatalytiques qui doivent être questionnés.

➤ **Le vieillissement des dispositifs :**

Plusieurs études ont également démontré l'importance d'une vérification de la performance épuratoire suivant la durée d'utilisation d'un produit commercialisé. En effet, certains systèmes vieillissent artificiellement (en laboratoire) montrent une diminution de leur performance épuratoire dans le temps. Dans la Figure 7 en Annexe 6, l'efficacité épuratoire diminue nettement (entre 20 % et 50 % selon le polluant [1]) après quatre mois de fonctionnement du système (vérifié performant d'après des tests normalisés<sup>43</sup>). Ce système, désigné E15 dans l'étude SafePHOTOCAT, présente un couplage de technologies (en l'occurrence, un média photocatalytique activé par une lampe UVC et associé à un filtre HEPA à charbon actif H10). Le critère « vieillissement » nécessiterait d'être étudié de manière approfondie car les causes de diminution de la performance épuratoire peuvent être diverses (baisse de l'intensité lumineuse des lampes UV, pertes d'activité du média photocatalytique liées à une détérioration du matériau ou à une saturation du média photocatalytique par des espèces adsorbées en surface,...).

➤ **La minéralisation (ou concentration de CO<sub>2</sub> formé) :**

Pour un système photocatalytique performant, en présence de polluants organiques dans l'air, une émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) démontre une efficacité épuratoire complète si le nombre de C du CO<sub>2</sub> formé est équivalent aux atomes de C initiaux des polluants ajoutés. Il est toutefois important de vérifier qu'en absence de polluants (COVs) le système lui-même ne génère pas de CO<sub>2</sub>. Dans le cas de certains couplages de technologies, une émission de CO<sub>2</sub> peut signifier parfois que des différents éléments constitutifs du dispositif sont émetteurs ou se dégradent. Certains systèmes<sup>44</sup> sont capables de produire du CO<sub>2</sub> en quantité supérieure à la quantité théorique estimée à partir de la teneur en COV dans l'air, mais pour autant cette production reste infime par rapport aux concentrations « habituelles » dans l'air [1].

Dans le cas idéal, pour prouver l'efficacité d'un dispositif photocatalytique, **(i)** le taux de minéralisation doit être déterminé (être proche de 100 %) avec un dispositif fonctionnant en présence de polluants, et **(ii)** la génération de CO<sub>2</sub> doit être négligeable si le dispositif de traitement de l'air fonctionne en absence de polluants.

➤ **Le débit d'air épuré :**

Le CADR ou débit d'air épuré est un indicateur permettant d'évaluer le niveau de performance d'un dispositif actif. Il est d'ailleurs recommandé de le déterminer en conditions contrôlées (selon la norme en vigueur). Un système de traitement de l'air fonctionne avec un certain débit d'air, qui détermine le temps nécessaire pour que le système puisse traiter au moins une fois l'air complet d'une pièce. De fait, l'air pollué (à épurer) au contact du média photocatalytique va avoir un temps de résidence déterminé par ce débit d'air. Pour un seul passage d'air, ce temps de contact peut donc être différent entre deux épurateurs fonctionnant avec des débits distincts, d'où potentiellement des performances différentes avec l'hypothèse que d'autres caractéristiques clés de la performance épuratoire ne varient pas (surface du média, intensité de l'irradiation,...). **Le CADR rend compte de l'efficacité photocatalytique d'épuration du système.** Dans le cas des dispositifs de traitement d'air autonomes, cette grandeur est forcément influencée par le débit d'air du système. Le CADR traduit l'effet du système sur la qualité de l'air en indiquant la réduction des concentrations de polluants attendue dans la pièce (donc en sortie d'appareil).

Idéalement, le CADR doit être déterminé dans des conditions réalistes de mise en œuvre (volume d'enceinte, nature et concentration des polluants) du dispositif de traitement. Par exemple, pour l'élimination des mêmes composés testés, deux épurateurs d'air (avec fonction photocatalytique démontrée) peuvent apparaître performant d'après la norme XP B44-013 (essai dans une enceinte de 1 m<sup>3</sup>) et pour autant les différences de performance ne peuvent être distinguées (l'un est-il meilleur que l'autre ?). En revanche, testés en conditions réalistes (essai en chambre expérimentale de 40 m<sup>3</sup>), donc cette fois avec un volume d'air à épurer 40 fois plus grand, un meilleur contraste des performances respectives peut être distingué entre les deux épurateurs. Le projet ETAPE a ainsi démontré, en

<sup>43</sup> Norme XP B44-013 dans le projet SafePHOTOCAT

<sup>44</sup> Observés pour les systèmes E8 et E15 dans le projet SafePHOTOCAT [1].

conditions réalistes d'essais (sur une même durée de fonctionnement), que le système S1 épure plus efficacement (avec un meilleur CADR calculé), comparé au système S2, pour le traitement d'une matrice gazeuse dite standard (mélange des 4 COVs<sup>45</sup> considérés dans la norme XP B44-013 en ajoutant le formaldéhyde), aussi bien à l'état neuf que vieilli (après plusieurs heures en fonctionnement) [2]. **Pour viser à une meilleure représentativité des résultats, les essais doivent être conduits dans une enceinte de volume en adéquation avec le débit d'air traité de manière à rester dans des conditions d'essais réalistes.**

➤ **L'humidité :**

Si l'humidité favorise la génération de radicaux libres (qui vont dégrader efficacement les polluants), l'humidité peut aussi réduire les quantités de certains polluants se fixant à la surface du catalyseur. Il est aujourd'hui démontré, en air intérieur, qu'une humidité anormalement élevée tend à diminuer les performances des systèmes photocatalytiques de tous types, en plus de favoriser les moisissures et l'inconfort. Le projet SafePHOTOCAT<sup>46</sup> l'a constaté notamment avec une nette diminution de la performance épuratoire lorsque l'humidité augmente au-delà de 20 %, sachant qu'habituellement l'humidité dans un logement peut être plus élevée, autour de 50 à 60 %.

➤ **La nature et l'intensité lumineuse :**

Sur la base de certains travaux de recherche, en situations réelles d'expositions et d'orientations pour un bâtiment existant<sup>47</sup>, la fraction UV (rayonnement solaire inférieur à 390 nm) présente dans l'environnement intérieur (soit, des milieux clos mais ouverts en général vers l'extérieur grâce aux vitrages) permet d'envisager l'usage *a priori* en air intérieur d'une technique de dépollution comme la photocatalyse [8]. Sachant aussi que les vitrages stoppent une partie des UV solaires et que les éclairages habituels en intérieur émettent peu d'UV, de nouveaux matériaux photocatalytiques incluant des dopants, métaux ou d'autres éléments tels que l'azote, le soufre, le carbone, sont mis sur le marché mais ils restent peu répandus. Aussi, qu'en est-il réellement de leur efficacité en lumière visible ? Il est indispensable de réaliser des études avec des sources d'irradiation rencontrées classiquement en éclairage d'intérieur, surtout pour des tests de performance avec des matériaux photocatalytiques passifs.

En présence d'un éclairage réaliste et représentatif d'environnements intérieurs, l'effet photocatalytique s'est avéré relativement faible pour divers matériaux photocatalytiques étudiés dans les conditions d'essai du projet IMP-AIR [6]. L'impact des matériaux sélectionnés sur les COVs s'est traduit majoritairement par une adsorption à leur surface. Ce mécanisme de transfert est apparu nettement supérieur à celui impliquant une dégradation photocatalytique, ce qui limite d'autant une potentielle performance épuratoire des matériaux photocatalytiques étudiés. Pour des peintures photocatalytiques non commercialisées<sup>48</sup>, mais validant le fait que le photocatalyseur était actif en lumière visible, il a été observé des dépassements des valeurs guide en air intérieur (VGAI) pour le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et pour l'acroléine. Pour ces polluants réglementés, les peintures photocatalytiques testées n'ont donc pas eu un effet de dépollution en air intérieur, mais au contraire elles ont montré un effet potentiellement néfaste sur la santé [8].

Dans le cas des épurateurs d'air autonomes, le risque majeur est le vieillissement des lampes installées (UVC ou UVA). Ce vieillissement est lié au temps de fonctionnement des systèmes (et donc à la durée de vie limitée de la lampe) ce qui peut conduire à des dispositifs non performants du fait d'une activation moindre du procédé photocatalytique.

➤ **Le contact avec le catalyseur (ou media photocatalytique) :**

L'abaissement des concentrations de polluants est lié à la possibilité d'un contact suffisant entre le polluant et la surface du photocatalyseur. Ce temps de contact va dépendre **(i)** du débit d'air pour les épurateurs (autonomes, CVC), et **(ii)** du brassage d'air dans la pièce pour les matériaux « photoactifs ». Or, très souvent dans un espace clos intérieur les polluants et micro-organismes présents dans l'air peuvent être évacués par une ventilation centralisée ou par l'aération naturelle, et cela avant même

<sup>45</sup> Acétaldéhyde, acétone, heptane et toluène (COVs testés avec la norme XP B44-013)

<sup>46</sup> Observé pour le système E10 dans le projet SafePHOTOCAT [1]

<sup>47</sup> Gandolfo et al. 2016. Spectrally resolved actinic flux and photolysis frequencies of key species within an indoor environment. Building and Environment 109, 50-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.026>, issu également de la référence [8]

<sup>48</sup> Préparées par un industriel pour des travaux de thèse en dopant une peinture blanche standard, entre 3,5 et 7 % en masse de dioxyde de titane nanométrique (NP deTiO<sub>2</sub>)

d'avoir été au contact du photocatalyseur ce qui rend le procédé photocatalytique inopérant. Les taux d'élimination des polluants par les dispositifs photocatalytiques sont donc à évaluer au regard des taux de renouvellement d'air au sein des espaces dans lesquels ils sont installés pour avoir une meilleure idée de leur pertinence.

➤ **Les variations de température :**

Elles peuvent avoir un impact indirect sur l'efficacité de la technique par photocatalyse en agissant sur **(i)** le vieillissement mécanique des matériaux, et **(ii)** l'adsorption des polluants à la surface des photocatalyseurs. Toutefois dans les environnements intérieurs, les variations de température auront peu d'impacts.

➤ **Le couplage de technologies :**

Pour le piégeage des COVs, certains fabricants d'épurateurs (systèmes photocatalytiques actifs) mettent en œuvre un étage complémentaire impliquant une autre technologie : par exemple un filtre à charbon actif. Dans ces cas-là, il est souvent difficile de distinguer la proportion de COVs détruits par le procédé photocatalytique ou seulement piégés par le procédé d'adsorption sur charbon actif. Certains systèmes actifs photocatalytiques<sup>49</sup>, éteints et en présence de COVs, montrent une diminution des concentrations en COVs qui sont adsorbés vraisemblablement par le biais d'autres procédés combinés tels qu'un filtre à charbon actif [1]. La complémentarité entre la photocatalyse et le filtre à charbon actif a également été mise en évidence dans le cas des oxydes d'azote dans une étude expérimentant un prototype innovant de traitement de l'air, en conditions réelles, c'est-à-dire intégré au réseau de ventilation d'un bâtiment tertiaire existant [5]. Si le charbon actif permet d'éliminer le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), la photocatalyse a un effet plus important dans l'élimination du monoxyde d'azote (NO) par oxydation en NO<sub>2</sub>, qu'il est aussi important de quantifier. D'autre part, cette expérimentation en conditions réelles a suggéré qu'un couplage de technologies en doublant le nombre de filtres à charbon actif pouvait être intéressant avec un épurateur type CVC, car un second filtre pourrait s'avérer utile en sortie globale du système pour limiter le relargage des sous-produits associés à une oxydation incomplète (COVs secondaires formés et non dégradés). Mais dans le cas des COVs légers (formaldéhyde, acétaldéhyde) qui ont une faible capacité d'adsorption sur charbon, ce type de filtre n'offre qu'un avantage modéré. D'autre part, si le couplage du procédé photocatalytique avec la technique du plasma froid est également en forte expansion dans certains produits commercialisés, qu'en est-il réellement de l'efficacité d'un tel système combiné sachant que le plasma froid peut générer des NOx à partir du N<sub>2</sub> de l'air ainsi que de l'ozone ? **Il conviendrait donc d'étudier de manière plus approfondie les combinaisons de technologies possibles avec la photocatalyse pour évaluer plus clairement leurs champs d'application.**

### **2.3. Des avancées obtenues mais des points à clarifier pour la photocatalyse en air intérieur**

***Quelles caractéristiques techniques recommander dans le domaine de la photocatalyse des systèmes actifs ?***

Pour améliorer l'efficacité de traitement de l'air (avec une bonne élimination de COVs primaires et des sous-produits formés transitoires), il peut être important d'agir sur les critères clés qui permettent de :

- **i)** maximiser le débit d'air épuré (CADR) d'un système en considérant son paramétrage valable dans des situations réalistes en termes de tailles de dispositif, de volumes d'air à traiter et de paramètres de confort ;
- **ii)** privilégier des systèmes présentant des débits d'air respectant les paramètres de confort et en cohérence avec le volume de la pièce à traiter ainsi que son taux de renouvellement d'air ;
- **iii)** préférer une géométrie du media favorable au temps de contact entre l'air pollué (à épurer) et le media photocatalytique ;
- **iv)** favoriser la plus grande surface possible irradiée du media photocatalytique lors de la conception du système et assurer une irradiation optimale et suffisante de l'ensemble du media photocatalytique.

---

<sup>49</sup> Observé avec le n-heptane et le toluène pour le système E10 du projet SafePHOTOCAT [1]

**...finalement pour conforter le choix d'un utilisateur, les critères techniques « clés » favorables à la performance sont difficiles à vérifier soi-même...**

Le démontage et l'inspection des systèmes de traitement de l'air, surtout pour les systèmes photocatalytiques actifs (ce que les chercheurs font au cours d'essais avec certains épurateurs d'air autonomes et épurateurs CVC), peut être une solution pour vérifier si le principe photocatalytique a bien été optimisé lors de sa mise en œuvre par le fabricant. Mais dans les faits, la recommandation la plus simple à donner à l'utilisateur potentiel est de vérifier si le dispositif ETV « *Environmental Technology Verification* », soutenu par l'ADEME, a approuvé les allégations des fabricants (conception, performance, innocuité). Cette vérification ETV est toujours réalisée par un laboratoire indépendant en s'appuyant sur les normes existantes dans le domaine de la photocatalyse.

**...et en définitive, certains indicateurs d'évaluation de performance épuratoire peuvent répondre aux besoins d'un usager sur le traitement de l'air par photocatalyse**

L'acheteur potentiel a besoin pour guider son choix d'un référentiel robuste et simple pour estimer la performance épuratoire des produits photocatalytiques (Annexe 1). Pour évaluer la performance d'un système actif de traitement de l'air, les normes actuelles centrées (NF EN 16846-1) ou non (NF B44-200) sur la photocatalyse se réfèrent au débit d'air épuré (CADR, qui est un indicateur normalisé). Un indicateur complémentaire IP qui est un indice de performance, proposé dans le cadre de travaux de recherche, pourrait permettre de comparer des systèmes actifs présentant des débits d'air contrastés et testés dans une même enceinte de grand volume (traitant le même volume d'air). Néanmoins, cet indicateur IP n'est pas intégré aux textes normatifs. Quant aux matériaux photocatalytiques passifs, des normes sont en cours de développement pour mieux évaluer leurs performances épuratoires mais cela devrait nécessiter de réaliser plus d'études en conditions réelles d'éclairage des surfaces.

## 2.4. Méconnaissance des effets sur la santé

**Le dioxyde de titane (du media semi-conducteur) pourrait-il se retrouver sous une forme nanométrique inhalable ?**

Les épurateurs d'air ou les matériaux (dits dépolluants) ayant recours à la photocatalyse utilisent en grande majorité du dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) comme catalyseur. Or, à l'échelle nanométrique, il est classé 2B par le CIRC<sup>50</sup> signifiant le caractère « cancérogène probable pour l'homme » par inhalation. La quantification de particules de  $\text{TiO}_2$  émises éventuellement par des produits photocatalytiques commercialisés, tout comme l'exposition des personnes, restent à ce jour assez peu étudiées. La récente bibliographie n'apporte pas de réponses homogènes car dans les quelques études réalisées sur ces sujets, soit une absence de particules dans l'air a pu être observée [1,6], soit une présence de particules dans l'air a pu être identifiée mais sans pouvoir tirer de conclusions sanitaires [7].

Dans le cadre du projet IMP-AIR, une émission de particules nanométriques et micrométriques a pu être observée pour l'ensemble des abrasions réalisées sur quatre familles de matériaux testés (céramique, peinture, lasure et enduit) [6]. La fraction nanométrique enregistrée pour les matériaux vieillis par abrasion est 2 à 15 fois plus importante (sans être pour autant sous forme unitaire) que celle des matériaux non vieillis. Les concentrations des émissions particulaires submicroniques et microniques étaient respectivement de l'ordre de  $10^6$  et  $10^3$  p/cm<sup>3</sup>. Ce phénomène émissif particulaire est fortement marqué également dans des scénarios de vieillissement par une exposition à l'ozone et aux UV-A. Les observations en microscopie électronique à balayage (MEB/EDS) ont permis d'identifier que les nanoparticules de dioxyde de titane ( $\text{nanoTiO}_2$ ) étaient systématiquement associées à la matrice du matériau. Aucune particule de  $\text{nanoTiO}_2$  isolée n'ayant été observée au MEB/EDS, cela a permis de vérifier l'innocuité des matériaux testés [6].

Pour approfondir les connaissances sur l'innocuité au regard des émissions possibles de particules (en  $\text{TiO}_2$  notamment), d'autres études récentes se sont intéressées également à des conditions simulant le vieillissement (suivant le temps de fonctionnement des épurateurs d'air ou l'abrasion ainsi que le nettoyage des matériaux). Si dans l'étude SafePHOTOCAT [1] aucun relargage de nano et microparticules n'a pu être quantifié pour les matériaux passifs (un carrelage et deux peintures) étudiés après un vieillissement par abrasion, en revanche dans l'étude EMANE [7] il a été possible de constater un relargage important et significatif de nanoparticules (jusqu'à 900  $\mu\text{g}$  de  $\text{TiO}_2$  émis par une peinture photocatalytique commercialisée) après un vieillissement par nettoyage.

<sup>50</sup> CIRC, Centre international de recherche sur le cancer, classement 2B

### **Formation de sous-produits de dégradation (dits « composés secondaires ») non transitoires et nocifs ?**

Si les conditions d'activation du photocatalyseur ne sont pas optimales alors la dégradation des polluants primaires peut être incomplète. Dans ce cas, la photocatalyse peut générer certains composés, appelés « sous-produits de dégradation », principalement des COV oxygénés, comme des cétones et des aldéhydes<sup>51</sup>. Ils peuvent avoir des propriétés toxiques et/ou irritantes, et être nocifs pour la santé ou l'environnement. Mais ces sous-produits peuvent se former à des concentrations parfois faibles [5]. Or, une faible dose ne conduit pas toujours à la dangerosité d'une substance. Dans des conditions d'essais typiques en air intérieur, c'est-à-dire avec des niveaux faibles de concentration en COVs primaires, de l'ordre du ppb (une partie par milliard correspondant à un rapport de 10<sup>-9</sup>), un processus photocatalytique même incomplet n'induit pas que le système d'épuration est dangereux pour la santé [5]. Par exemple, avec des niveaux de formaldéhyde produits qui sont inférieurs à la VGAI (valeur guide pour l'air intérieur) et des concentrations en COV totaux qui diminuent. Mais, qu'en serait-il dans un environnement intérieur avec des concentrations initiales en COV primaires plus élevées ? L'innocuité serait-elle encore garantie dans ces conditions majorées ? Les concentrations des « sous-produits », issues d'une dégradation incomplète, seraient-elles aussi plus élevées ? Dans l'étude ETAPE [2], des émissions ont été observées pour des espèces gazeuses ne correspondant pas aux molécules attendues dans un mécanisme photocatalytique de la dégradation des COVs primaires injectés dans l'enceinte expérimentale. Or, ces émissions étaient dues vraisemblablement à la composition des matériaux constituant certains systèmes<sup>52</sup> eux-mêmes (avec par exemple comme composés secondaires : siloxanes, cyclohexane, acide formique butyle ester, ou encore isopentanes, isocyanates, 2-méthylhexane, m et p-xylène et o-xylène) [2]. Enfin, dans le projet IMP-AIR, une formation de sous-produits réactionnels, liée aux réactions incomplètes de la photocatalyse, a aussi été observée pour plusieurs matériaux photocatalytiques (peinture, céramique et lasure), et ce phénomène pouvant présenter un risque sanitaire potentiel. Cependant, la formation de formaldéhyde est restée relativement faible [6]. En revanche, dans une autre étude [8], réalisée en conditions réelles (dans un bâtiment existant) avec des peintures photocatalytiques non commercialisées, il a pu être mis en évidence la formation hétérogène d'acide nitreux à des concentrations significatives, suite à l'élimination de dioxyde d'azote par photocatalyse (entre 4 à 20 % de HONO formé par rapport au NO<sub>2</sub> dégradé). Or, l'acide nitreux est un composé nocif pour l'homme. Par photolyse, il peut aussi participer jusqu'à 20 % à la formation d'espèce oxydante de type radical hydroxyle (°OH) connu pour son rôle majeur sur la chimie en air intérieur.

**Des essais avec différents dispositifs de traitement de l'air, conduits dans des conditions réalistes d'utilisation quotidienne, permettraient d'évaluer leur aptitude à former ou non des composés secondaires et donc d'identifier les dispositifs qui offrent une réelle innocuité de ce point de vue.**

## **2.5. Consommation énergétique**

Les épurateurs photocatalytiques consomment de l'énergie pour fonctionner, soit d'une manière relativement limitée notamment pour les petits systèmes autonomes soit avec des besoins plus importants en puissance pour les systèmes de type CVC (chauffage, ventilation et climatisation), destinés à intégrer un bâtiment, qui vont traiter des volumes d'air plus grands. Il y a assez peu d'études qui portent à la fois sur la performance épuratoire et sur la consommation énergétique [5, 4].

## **2.6. Nécessité d'une certification (ou vérification d'une tierce-partie) des produits**

Avec de multiples offres, disponibles sur le marché de la photocatalyse, les consommateurs et maîtres d'ouvrage n'ont que peu de moyens, à ce jour, pour connaître l'efficacité réelle des appareils et matériaux commercialisés. Grâce aux normes existantes, faire vérifier la performance ainsi que l'innocuité de systèmes d'épuration et de matériaux devient possible. Dans le cadre d'une vérification

<sup>51</sup> Formaldéhyde classé cancérigène certain chez l'homme (groupe 1) par le CIRC en 2004. Acétaldéhyde classé cancérigène possible chez l'homme (groupe 2B) par le CIRC en 1999

<sup>52</sup> Observé pour le Système S1 (siloxanes), pour le Système S2 (cyclohexane, acide formique butyle ester) et le Système S3 (isopentanes, isocyanates, cyclohexanes, siloxanes) et le Système S4 (acide acétique butyle ester, 2-méthylhexane, m et p-xylène et o-xylène) dans le projet ETAPE [2]

d'allégations des entreprises revendiquant des propriétés épuratrices pour leurs produits innovants, l'ADEME a mis en place une procédure d'accompagnement des PME souhaitant aller vers une vérification ETV « *Environmental Technology Verification* » ([www.verification-etv.fr](http://www.verification-etv.fr)). Une vérification ETV des performances revendiquées par les entreprises va contribuer à renforcer la crédibilité de la technologie et la confiance du marché en s'appuyant sur des données de tests de haute qualité. Le coût d'une vérification ETV va dépendre de la complexité de la technologie et du nombre de paramètres de performance à vérifier par un organisme de vérification indépendant, et ce coût est de 20 Keuros en moyenne. Des entreprises concevant des dispositifs innovants de traitement de l'air basés sur la technique de photocatalyse peuvent lancer, en France, une démarche de vérification ETV pour faire **vérifier par une tierce-partie les performances de l'éco-technologie innovante qu'ils mettent sur le marché**. Pour en savoir plus sur les résultats<sup>53</sup> le site du dispositif ETV peut être consulté.

Un autre dispositif, Eurovent Certita certification ([www.eurovent-certification.com](http://www.eurovent-certification.com)) propose une certification de systèmes de traitement de l'air. Ce programme de certification s'adresse à des modèles d'épurateurs d'air éligibles, c'est-à-dire conformes aux référentiels NF-536 « Epurateurs d'air » et ECP Air Cleaners (ACL). La certification Eurovent Certita ne vise pas le seul marché français (elle vise tous les pays). Quatre catégories de contaminants (particules, COVs, micro-organismes, allergènes) sont à vérifier avec des essais réalisés suivant des références normatives mises à jour et pour un coût moyen estimé à 22 Keuros.

Les fabricants de solutions techniques de traitement de l'air peuvent également se rapprocher de laboratoires R&D (publics ou privés) pour les aider à une évaluation scientifique de leurs produits en termes de performance et d'innocuité.

### 3. Actions de l'ADEME

(Pour en savoir plus)

#### 3.1. Recherche

L'ADEME soutient le développement de la recherche et le benchmark sur la performance et l'innocuité des procédés photocatalytique. Depuis près de quinze ans, l'ADEME publie des résultats d'études sur la photocatalyse : états de l'art sur les matériaux photocatalytiques (utilisés en milieu extérieur et intérieur) et recherches sur certains produits photocatalytiques commercialisés ou innovants (des épurateurs d'air qu'ils soient autonomes ou couplés au réseau de ventilation des bâtiments et divers matériaux) [1 à 8]. L'appel à projets de recherche CORTEA « *COnnaissance, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air* » porte, entre autres, sur le traitement de l'air, notamment en air intérieur. Les éditions CORTEA 2013 et 2016 ont par exemple permis de sélectionner plusieurs projets sur l'évaluation de la performance et de l'innocuité de systèmes d'épuration de l'air [1,2] et de matériaux [2,7] par photocatalyse. D'autres appels à projets pilotés ou co-pilotés par l'ADEME ont aussi permis de sélectionner plusieurs projets de recherche en lien avec la technologie de la photocatalyse : l'APR BAT\_RESP « *Vers des bâtiments responsables à horizon 2020* » [5], l'APR PRIMEQUAL « *Programme de Recherche Interorganisme pour une MEilleur QUALité de l'air* » [6]. L'ADEME soutient également des thèses et en particulier deux sujets ont porté ces dernières années sur les épurateurs d'air autonomes photocatalytiques et les peintures photocatalytiques [3, 8].

#### 3.2. Normalisation

L'ADEME a contribué en 2011 à la publication de la norme française **NF B44-200** sur les épurateurs d'air autonomes. Des travaux de recherche<sup>54</sup> soutenues par l'ADEME entre 2003 et 2010 ont en effet permis par la suite en 2016 sa transposition au niveau européen NF EN B44-200. Cette norme est notamment retenue parmi les critères d'évaluation de performance des appareils lors de leur certification.

Le soutien de l'ADEME depuis 2016 au secrétariat AFNOR (B44A) « Photocatalyse » a facilité le transfert des nouvelles connaissances issues de la recherche pouvant être utiles à l'évolution des textes

<sup>53</sup> <http://www.verification-etv.fr/eolis-air-manager-1200.90.htm>

<sup>54</sup> Epurateur I « Mise en place de protocoles de qualification des appareils d'épuration d'air » (Rapport ADEME n°0404C0080, mai 2006) et Epurateur II « Développement d'une méthode d'essais des épurateurs d'air » (Rapport ADEME n°0604C0082, janvier 2010).



normatifs [9]. Les essais normatifs en enceinte confinée (ou de faible volume, # 1 m<sup>3</sup>), bien qu'apportant des éléments d'information pertinents pour déterminer les performances intrinsèques des dispositifs photocatalytiques, ont été jugés, grâce à des résultats scientifiques démontrés, comme assez peu représentatifs des conditions réelles d'utilisation. Une partie 2 à la norme européenne NF EN 16846-1 est donc à l'étude depuis 2018 afin de normaliser une méthode d'essai en grande enceinte (30 à 40 m<sup>3</sup>), ce qui devrait permettre de mieux prendre en compte la diversité des situations en air intérieur et mieux définir des performances plus réalistes. Cette évolution normative valorise entre autres les résultats du projet ETAPE soutenu par l'ADEME. En 2019, le protocole d'essais à mettre en place dans le cadre de ce futur projet de norme - Partie 2 - a été discuté avec les experts de la CN AFNOR/B44A « Photocatalyse », et en 2020 les premiers essais inter-laboratoires pourront être lancés aux niveaux français ou européen. Plusieurs normes existent déjà sur les matériaux photocatalytiques, issues des commissions « B44A - Photocatalyse » et « Céramiques techniques »<sup>55</sup>, et il était aussi envisagé d'inclure des peintures photocatalytiques « dites dépolluantes »<sup>56</sup> dans un projet de norme européenne d'essais (**prEN 16980-2**) pour l'évaluation de l'efficacité de matériaux photocatalytiques dans l'élimination des COVs. Mais ces essais inter-laboratoires prévus être lancés en 2020, en particulier avec des concentrations primaires en acétaldéhyde, n'auront pas lieu finalement car les peintures « dépolluantes » commercialisées en France procèdent plutôt par captation chimique, par adsorption chimique ou physique que par photocatalyse.

### 3.3. Certification (ou Vérification tierce-partie)

Si la vérification ETV est déjà reconnue en France pour les technologies de la surveillance et du traitement de l'air, la France intervient aussi auprès de la Commission européenne et de son programme pilote européen ETV, lancé en 2011, pour ouvrir, sur l'agenda 2020 du programme, ses domaines technologiques à celui de l'air ce qui permettrait également de mieux faire reconnaître au niveau européen la vérification ETV des technologies de traitement de l'air.

L'intérêt pour des fabricants est en particulier **(i)** de faciliter l'accès au marché de cette technologie grâce à l'obtention d'un rapport de vérification de performances contenant des données crédibles et fiables vérifiées par une tierce partie reconnue, et **(ii)** d'utiliser ce rapport pour convaincre les premiers acheteurs/utilisateurs de leurs allégations, y compris à l'export.

## 4. Conclusions

### CE QUE L'ADEME DÉMONTRE

Au regard des travaux, études de recherche et thèses, soutenus récemment et référencés dans ce document, l'ADEME souligne que de nouveaux éléments scientifiques, collectés et analysés, permettent de démontrer pour certaines situations d'essais en conditions réalistes, l'efficacité et l'innocuité de certains dispositifs d'épuration de l'air intérieur par photocatalyse. Cette conclusion permet de compléter l'avis de l'ANSES dans son auto-saisine « 2012-SA-0236 »<sup>57</sup>. Toutefois, des limites et incertitudes demeurent. Elles sont souvent liées à des conditions d'optimisation trop incertaines dans la mise en œuvre de la technologie par photocatalyse.

### CE QUE L'ADEME PRÉCONISE

Pour l'ADEME, la première des priorités en matière d'amélioration de la qualité de l'air doit être donnée à la prévention de la pollution et au renouvellement de l'air. En air intérieur, les sources de pollution doivent être limitées, ensuite l'évacuation des polluants doit être favorisée par le renouvellement de l'air (aération, ventilation des bâtiments). Une troisième solution complémentaire pourrait être l'épuration de l'air, si l'action est vraiment nécessaire et toujours avec une démarche globale de gestion de la qualité de l'air intérieur. En premier lieu, il est important de rappeler que les actions en faveur de la qualité de

<sup>55</sup> NF ISO 18562-1, ISO 22197-1, NF ISO 22197-2 à 5, NF ISO 22197-2, NF ISO 22197-3, NF ISO 22197-4, NF ISO 22197-5.

<sup>56</sup> Il existe deux techniques pour les peintures dites « dépolluantes », soit par une réaction chimique de captation et piégeage des composés (la peinture dépollue en absorbant), soit par l'utilisation des propriétés photocatalytiques (la peinture dépollue en détruisant).

<sup>57</sup> <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf>

l'air intérieur, pour limiter autant que possible les émissions de polluants, sont à réfléchir dès l'achat des matériaux ou produits (pour certains<sup>58</sup> en choisissant les moins émissifs à l'aide d'un étiquetage spécifiant le niveau des émissions en composés organiques volatils) et en évitant les activités à risque (tabagisme, utilisation fréquente de désodorisants à combustion), en privilégiant des produits ménagers labélisés et en aérant pendant les activités de nettoyage et bricolage. En second lieu, le renouvellement de l'air intérieur est une action très importante à réaliser, en continu grâce à une ventilation performante (en assurant une bonne maintenance du système de VMC) et, grâce à une aération suffisante chaque jour (ouvrir les fenêtres pendant 10 mn, ne pas obstruer les bouches d'aérations).

Les produits photocatalytiques commercialisés peuvent éventuellement être employés pour épurer un air plus ou moins pollué, si l'intensité lumineuse (naturelle ou artificielle) assurant l'irradiation du média photocatalytique est adaptée et si le débit d'air permettant le transport des composés gazeux vers les systèmes et matériaux photocatalytiques offre un temps de contact suffisant pour que le processus d'oxydation photocatalytique puisse avoir lieu de façon optimale. Dans des conditions optimisées, le procédé d'épuration par photocatalyse a été vérifié performant pour plusieurs produits photocatalytiques commercialisés [1,2,3,4,5,6,7]. Mais, si les conditions de mise en œuvre ne sont pas optimisées, alors performance et innocuité ne sont pas toujours acquises comme cela a pu être démontré dans plusieurs travaux de recherches récents [1,2,4,5,6].

Malgré une offre commerciale diversifiée, l'utilisation des matériaux photocatalytiques reste limitée dans les ambiances intérieures, principalement car les conditions optimales de performance sont difficilement réunies. Les recherches devraient se poursuivre, en conditions réalistes surtout, pour approfondir les connaissances sur les impacts de ces systèmes photocatalytiques sur l'environnement et la santé (liés à l'évolution dans le temps du semi-conducteur – dissémination, toxicité – et à la génération éventuelle de sous-produits toxiques par le procédé de photocatalyse).

En l'état actuel des connaissances, sans garanties probantes de l'efficacité et surtout de l'innocuité du procédé par photocatalyse, quel que soit le type de produits commercialisés, l'ADEME préconise une meilleure prise en compte des travaux de normalisation existants. Afin de valider les performances environnementales de leurs systèmes innovants dans le domaine de la photocatalyse, les constructeurs sont encouragés à faire vérifier leur technologie par une tierce partie dans le cadre du dispositif de vérification ETV (Environmental Technology Verification), soutenu par l'ADEME.

Enfin, si une vérification des performances (via ETV ou autre certification) n'a pu être menée par les fabricants et qu'un traitement de l'air s'avère nécessaire, l'ADEME recommande de se référer aux conclusions du comité d'experts spécialisé « *Evaluation des risques liés aux milieux aériens* » rendues dans l'avis ANSES<sup>59</sup> de septembre 2017 qui souligne qu'à ce jour parmi les technologies du domaine du traitement de l'air intérieur seule la filtration mécanique peut être perçue comme étant « sans danger », sous réserve d'un bon entretien avec ce type de systèmes sinon ils peuvent être également à l'origine d'une détérioration de la qualité de l'air. Mais cette technique agit sur les particules mais pas les gaz.

## CE QUE L'ADEME IMPULSE (principalement en normalisation)

Les récentes avancées dans le domaine de la photocatalyse, notamment pour les épurateurs d'air autonomes, permettent de **proposer plusieurs recommandations visant à faire évoluer les textes normatifs du domaine de la photocatalyse** : **(i)** tenir compte d'essais jugés plus réalistes, c'est-à-dire menés dans une enceinte dont le volume soit compatible avec le débit d'air effectif d'un système testé et en respectant les paramètres de confort en air intérieur. À titre indicatif, le rapport entre le débit d'air du système et le volume de l'enceinte pourrait être compris entre 0,5 et 5 h<sup>-1</sup> si l'on se réfère aux travaux ETAPE [1] ; **(ii)** préconiser des essais basés sur une composition gazeuse de référence car il est très important de prendre en compte la spécificité de l'atmosphère traitée (c'est-à-dire une matrice « air » à normaliser selon certains composés organiques volatils (COVs), idéalement le toluène et le formaldéhyde, mais aussi selon des COVs spécifiques de l'ambiance intérieure dans laquelle l'épurateur testé est ensuite mis en œuvre – l'halothane si milieu type hospitalier - le benzène et le 1,3-butadiène si milieu type urbain –  $\alpha$ -pinène si milieu type bâtiment bois) ; et enfin **(iii)** réaliser aussi, si possible, des essais en conditions de vieillissement (car en général, la performance diminue avec l'intensité ou la

<sup>58</sup> Depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2013, une obligation d'étiquetage réglementaire doit spécifier des indications qualitatives sur 10 polluants volatils ainsi que les COVs totaux émis par certaines catégories de produits utilisés en intérieur (produits de construction, de revêtements de mur ou de sol, des peintures et des vernis)

<sup>59</sup> [Saisine ANSES de 2017](https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf) sur l'identification et l'analyse de cinq techniques d'épuration de l'air intérieur émergentes (techniques de piégeage ou techniques d'oxydation (destructives) dont la photocatalyse) <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf>

nature du vieillissement : selon le temps de fonctionnement d'un système/ l'abrasion du matériau/ le nettoyage du matériau) et dont l'influence du vieillissement a déjà pu être démontré dans plusieurs travaux de recherche [1, 2, 7].

## Pour en savoir plus

### Publications

- [1] SafePHOTOCAT / Costarramone N., Lacombe S., Pécheyran C., Desauziers V., Evstratov A., Cantau C. 2015. Traitement de l'air intérieur par photocatalyse. Performance et innocuité de systèmes et matériaux photocatalytiques commerciaux. [Rapport](#) ADEME (convention n°1362c0027), 164 pages. <https://www.ademe.fr/traitement-lair-interieur-photocatalyse-projet-safephotocat>
- [2] ETAPE / Thévenet F. et Hecquet V. 2017. Traitement de l'air intérieur par photocatalyse –Évaluation de l'innocuité des systèmes de traitement de l'air par photocatalyse. [Rapport](#) ADEME (convention n°1362c0025), 124 pages. <https://www.ademe.fr/traitement-lair-interieur-photocatalyse-projet-etape>
- [3] HARB P., 2017. Evaluation des performances et de l'innocuité de systèmes de traitement de l'air intérieur en conditions réelles. [Rapport](#) de thèse ADEME, 220 pages <https://www.ademe.fr/mediatheque/recherche?query=harb>
- [4] EPURATEUR3 / Blondeau P., Abadie M., Durand A., Deleglise C., Kaluzny P., Para S., Ginestet A., Pugnet D., Tourelles C., Duforestel T., Squinazi F. 2015. Qualification énergétique et sanitaire des systèmes d'épuration intégrés aux réseaux de ventilation. Rapport ADEME (convention n°1204c0011), 139 pages.
- [5] CUBAIR / Hort C., Petit J.-F., Bruno P., Binet M., Platel V., Andres Y., Hecquet V., Moynault L., Coulbaux G., Hallemands É., Lerey S., Neaud C. 2018. Améliorer la qualité de l'air intérieur dans un bâtiment tertiaire - CUBAIR: Confort des usagers des bâtiments tertiaires par l'usage de techniques de traitement de l'air. [Six rapports](#) ADEME (convention n°1462v0032), 28 pages (rapport1-cahier des charges), 42 pages (rapport2-laboratoire), 52 pages (rapport3- conception intégration), 46 pages (rapport4-performances), 20 pages (rapport5-impact énergétique), 28 pages (rapport6-analyse cycle de vie). <https://www.ademe.fr/ameliorer-qualite-lair-interieur-batiment-tertiaire-projet-cubair>
- [6] IMP-AIR / Nicolas M., Boutry D., Bartolomei V., Delaby S., Loisel G., Maupetit F., Sang A., Thiry P., Damlencourt J.F., Fiorentino B., Guiot A., Philippot C. 2016. Impact des matériaux photocatalytiques sur la qualité des environnements intérieurs. [Rapport et synthèse](#) ADEME (convention MEDDE n°12MRES-PRIMEQUAL-3-CSV-8), 106 pages et 7 pages. <http://www.primequal.fr/fr/projets/projets-en-cours/environnements-interieurs-et-approches-innovantes/imp-air-impact-des>
- [7] EMANE / ADEME, CSTB, LNE. 2017. Étude du relargage de nano-objets manufacturés en fonction du vieillissement de matériaux nanocomposites dédiés au bâtiment. [Rapport](#) ADEME (convention n°1404C0018), 182 pages. <https://www.ademe.fr/etude-relargage-nano-objets-manufactures-fonction-vieillissement-materiaux-nanocomposites-dedies-batiment> (réalisé par Motzkus C., Delaby S., Gaie-Levrel F., Feltin N., Nicolas M.)
- [8] GANDOLFO A., 2018. Incidence de la chimie hétérogène des oxydes d'azote sur la qualité des atmosphères intérieures : impacts des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> dans les peintures. [Rapport](#) de thèse ADEME, 285 pages. <https://www.ademe.fr/incidence-chimie-heterogene-oxydes-dazote-qualite-atmospheres-interieures>
- [9] MACE DUBOIS Timothée, AFNOR NORMALISATION, ADEME. 2018. Normalisation en photocatalyse - Bilan des travaux suivis par la Commission AFNOR/B44A sur la période 2017-2018. [Rapport](#) ADEME (convention n°1662c0010), 28 pages. <https://www.ademe.fr/normalisation-photocatalyse>

### Autres références

- [Guide pratique ADEME « Un air sain chez soi » - Septembre 2019](#)
- [Guide pratique ADEME « Moins de produits toxiques » – Janvier 2019](#)

- Delaby S. et Nicolas M. 2012. Impact des matériaux photocatalytiques sur les polluants chimiques et microbiens des environnements intérieurs. Rapport ADEME (convention n°1062c0024), 70 pages
- Puzenat E., Hermann J.M. et Guillard C. 2011. Matériaux photocatalytiques pour le traitement de l'air extérieur. Rapport ADEME (convention n°1062c0029), 37 pages.
- [Bulletin de l'OQAI n°4 : L'épuration par photocatalyse, opportunité ou menace pour la qualité de l'air intérieur ?](#) –juin 2012
- [Dispositif ETV](#)

## Remerciements

Ce document a bénéficié de la relecture de plusieurs scientifiques (dont les porteurs de projets cités à la rubrique « Pour en savoir plus/ Publications »), ainsi que de nombreux avis d'experts du domaine de la photocatalyse/AIR (notamment, à l'AFNOR et pour les dispositifs Environmental Technology Verification (ETV) et Eurovent Certita certification).

Nous remercions les personnes suivantes (par ordre alphabétique) :

Pour leurs contributions écrites Patrice Blondeau, Nathalie Costarramone, Stéphane Delaby, Chantal Guillard, Elise Hallemons, Mélanie Nicolas et Frédéric Thévenet, et aussi pour la qualité des échanges Pascal Kaluzny, Gregory Kelijian, Pierre Kerdoncuff et Thimothée Macé Dubois.

Les travaux en thèse de Pamela Harb et d'Adrien Gandolfo, avec le soutien de l'ADEME, ont permis aussi d'améliorer les connaissances sur le sujet de la photocatalyse en air intérieur.

**La position de l'ADEME s'est construite grâce à de nombreux échanges avec les experts cités, sans être unanimes sur tous les points, et engage seule l'ADEME.**

## Contacts à l'ADEME

Laurence Galsomiès au service qualité de l'air ([laurence.galsomies@ademe.fr](mailto:laurence.galsomies@ademe.fr))

Pierre Deroubaix au service bâtiment ([pierre.deroubaix@ademe.fr](mailto:pierre.deroubaix@ademe.fr))

## Annexe 1 – Définition et mode de calcul des indicateurs de performance épuratoire (CADR, IP)

### CADR /

débit d'air épuré (ou en anglais *clean air delivery rate*)

#### Qu'est-ce que c'est... ?

Le débit d'air épuré, noté CADR (en anglais : *clean air delivery rate*), est un indicateur permettant d'évaluer le niveau de performance d'un dispositif de traitement. C'est le paramètre actuellement retenu dans les normes portant sur les dispositifs de traitement de l'air par photocatalyse. Le CADR caractérise la performance épuratoire d'un dispositif dans une enceinte de volume donné. La détermination des CADR vis-à-vis de COVs différents permet de caractériser le comportement d'un même système de traitement vis-à-vis de chaque polluant. Néanmoins, le CADR reste dépendant du débit de fonctionnement du système. À ce titre, il ne permet pas de comparaison directe entre les dispositifs, même si ceux-ci sont testés dans une même enceinte et dans des conditions expérimentales identiques.

#### Comment le déterminer... ?

Le CADR s'exprime en m<sup>3</sup>/h. La définition du CADR a été proposée par l'Association of Home Appliance Manufacturers (AHAM). Le CADR selon l'AHAM du débit d'air (Q) du système d'épuration actif et de l'efficacité de traitement ( $\varepsilon$ ) définie par les concentrations de polluants en entrée C<sub>i</sub> (initial) et en sortie C<sub>e</sub> (épuré) de l'appareil :

$$\text{CADR} = \varepsilon \times Q \text{ (avec } \varepsilon = 1 - C_e/C_i \text{)}$$

Cette définition est identique à celle indiquée dans la norme européenne NF EN 16846-1 :

$$\text{CADR} = V \times (k_e - k_n)$$

La seconde forme de cette équation est adaptée au protocole expérimental proposé dans la norme NF EN 16846-1. Les constantes de déclin (ou décroissance), k<sub>e</sub> et k<sub>n</sub> (exprimées en h<sup>-1</sup>), sont mesurées pour chaque COV primaire injecté dans une enceinte de volume V (exprimé en m<sup>3</sup>). La différence entre la constante de déclin d'un COV en présence de l'épurateur activé (k<sub>e</sub> exprimé en h<sup>-1</sup>) et la constante de déclin naturelle de ce COV (k<sub>n</sub> exprimées en h<sup>-1</sup>), c'est-à-dire en l'absence de système de traitement, caractérise le déclin induit par le dispositif de traitement.

#### CADR dans les normes... ?

paramètre cité dans les normes NF B44-200 et NF EN 16846-1.

### IP /

indice de performance

#### Qu'est-ce que c'est... ?

L'indice de performance, noté IP, vise à fournir une grandeur adimensionnelle permettant de comparer les performances de plusieurs dispositifs entre eux. Comme le CADR, l'IP nécessite la réalisation d'essais dans les mêmes conditions (matrice de polluants, volume d'enceinte), et il peut être déterminé pour chaque COV. L'IP, en normalisant le CADR par le débit d'air traité par le dispositif vise à s'affranchir de ce dernier paramètre et à permettre une meilleure comparaison des dispositifs, même s'ils fonctionnent à des débits différents. L'IP est équivalent à l'efficacité  $\varepsilon$  du dispositif, néanmoins il peut être supérieur à 1 du fait des conditions expérimentales des essais.

#### Comment le déterminer... ?

L'IP est une grandeur sans dimension :

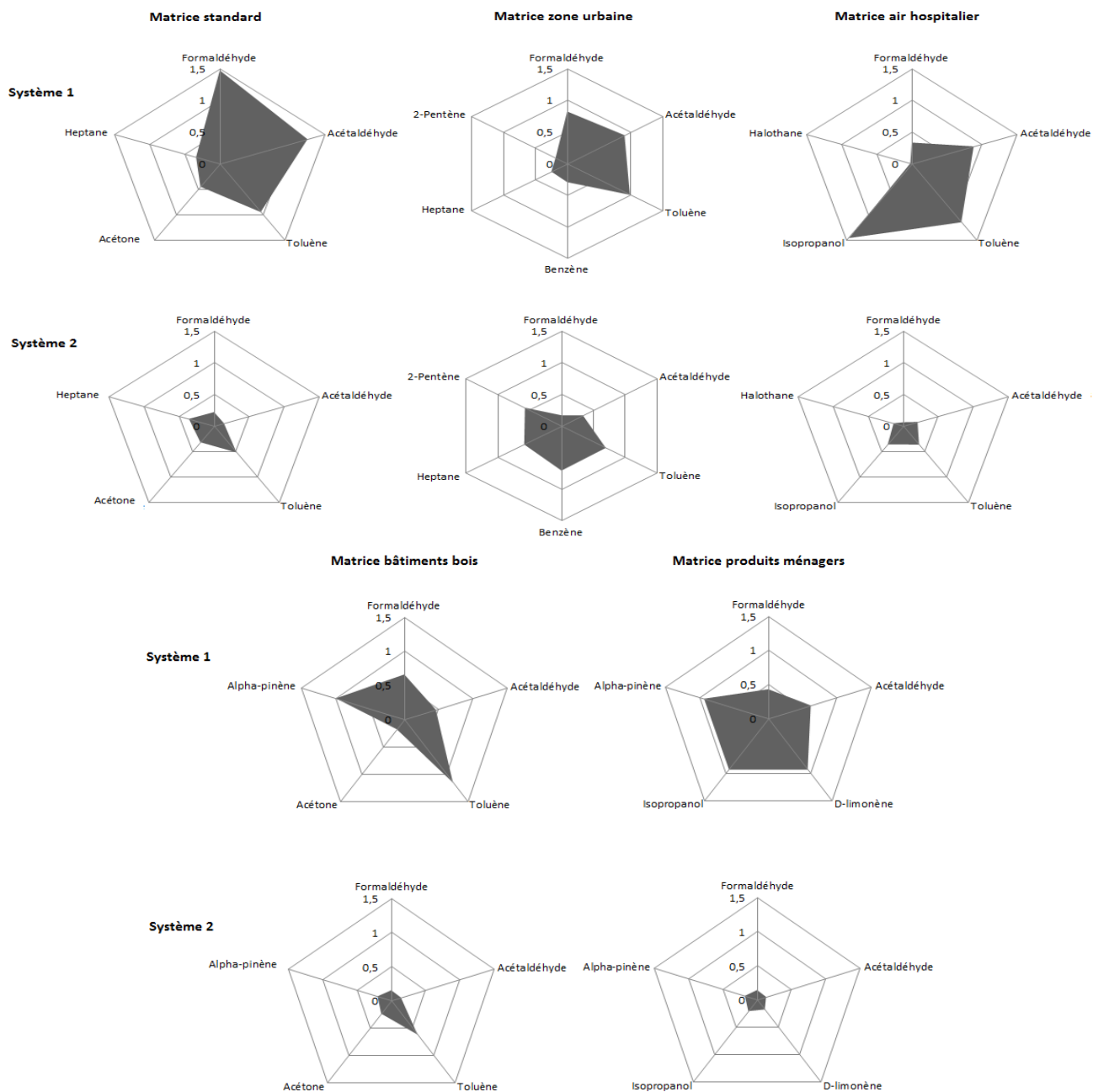
$$\text{IP} = \text{CADR} / Q = (V \times (k_e - k_n)) / Q$$

L'indice de performance est calculé à partir des valeurs de CADR (exprimées en m<sup>3</sup>/h), ces-dernières sont divisées par le débit effectif du système étudié, noté Q et exprimé en m<sup>3</sup>/h. Le calcul de l'indice de performance IP nécessite donc la détermination de la valeur de CADR ainsi que la mesure du débit effectif du système de traitement de l'air.

**IP dans les normes... ?** paramètre défini à titre exploratoire dans le cadre d'un projet de recherche et non repris à ce jour dans les normes (issu du projet ETAPE [2]).

## Annexe 2 – Influence de la composition de l'air à traiter (évaluation de la performance par l'IP)

Indices de performance en fonction de la spécificité des ambiances intérieures (caractérisées par des polluants types)



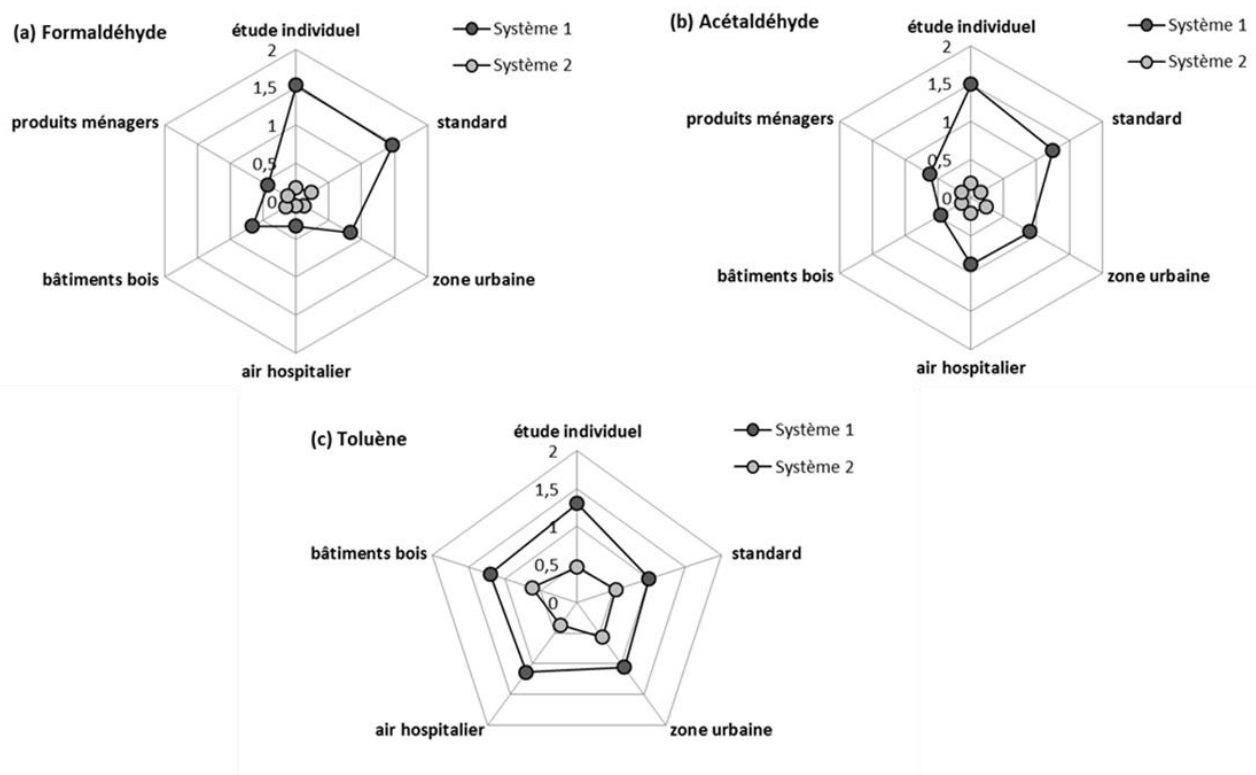
**Figure 2:** Comparaison des performances épuratoires, en termes d'IP, de systèmes d'air autonomes (Système-1 et Système-2) vis-à-vis de cinq matrices gazeuses (standard, air urbain, air hospitalier, bâtiment bois, produits ménagers) en enceinte grand volume [3]

**NB:** Volume d'enceinte testé à 40m<sup>3</sup>; fonction photocatalytique démontrée dans les systèmes-1 et -2

## Annexe 3 – Influence de la composition de l’air à traiter (évaluation de la performance par l’IP)

Indices de performance en fonction d’un polluant  
(FORMALDÉHYDE, ACÉTALDÉHYDE, TOLUÈNE)  
dans différentes ambiances intérieures (Matrices type)

Ce type de graphique (radar) permet de montrer que l’élimination de certains COVs, traités par différents dispositifs photocatalytiques de traitement de l’air (Système-1 ou Système-2, à titre d’exemple), peut varier en intensité selon la composition de la matrice gazeuse. L’effet « matrice » est très marqué pour le formaldéhyde et l’acétaldéhyde. Ces deux COVs sont éliminés dans la matrice standard (pour le Système-1, le plus efficace, avec un IP à 1,5 et 1,25 respectivement), mais nettement moins bien éliminés dans la matrice des produits ménagers (IP à 0,5 et 0,7 respectivement pour le Système-1 le plus efficace). En revanche, le toluène se montre plutôt « insensible » à l’effet de la matrice car quelle que soit la matrice d’air dans laquelle il se trouve, ses valeurs d’IP restent relativement proches (IP entre 1 et 1,4 pour le Système-1 le plus efficace selon les ambiances intérieures).

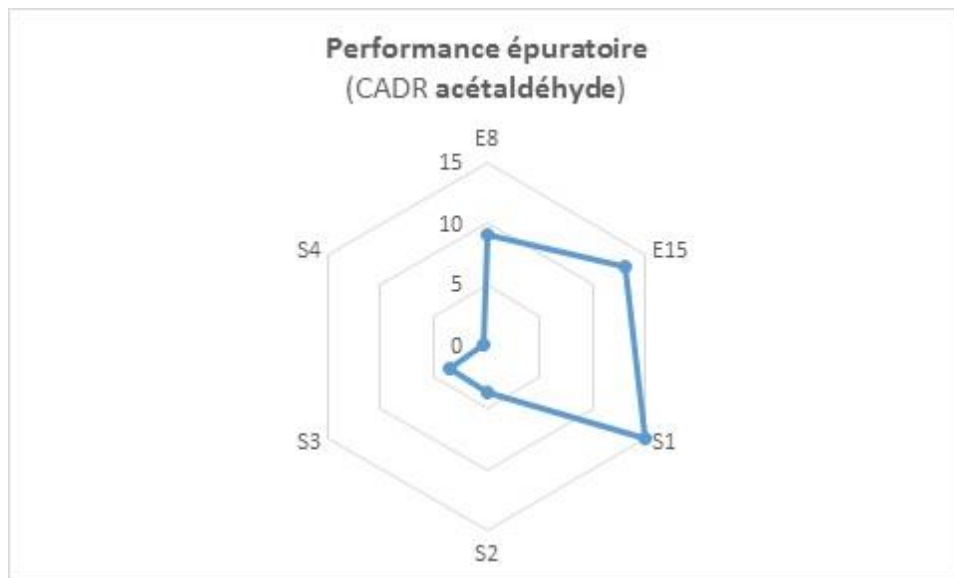


**Figure 3:** Comparaison des valeurs d’indices de performance (IP) entre deux systèmes (Système-1 et Système-2) pour le formaldéhyde (a), l’acétaldéhyde (b) et le toluène (c) lorsque ces COVs sont traités individuellement ou au sein de chacune des matrices gazeuses (standard, air urbain, air hospitalier, bâtiment bois) de systèmes d’air autonomes (Système-1 et Système-2) en enceinte grand volume [1, 3]

**NB :** Volume d’enceinte testé à 40m<sup>3</sup> ; fonction photocatalytique démontrée dans les systèmes-1 et -2

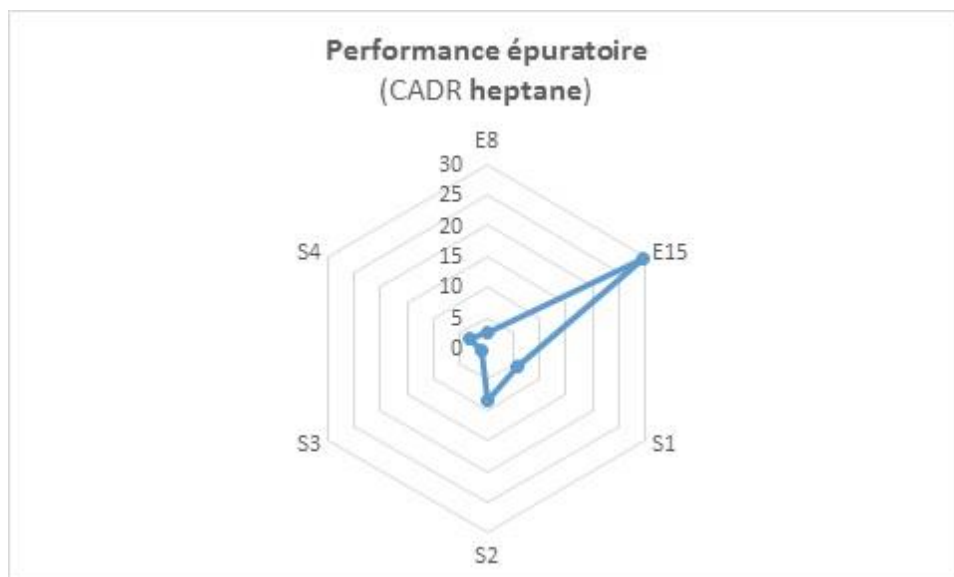
## Annexe 4 – Influence des systèmes d'épuration (évaluation de la performance par le CADR)

Débits d'air épuré par polluant (ACÉTALDÉHYDE et HEPTANE)  
pour 6 épurateurs d'air autonomes



**Figure 4 :** Performance épuratoire de six systèmes photocatalytiques (E8, E15, S1, S2, S3, S4) pour l'acétaldéhyde [1, 2]

**NB :** Volume d'enceinte testé à 1m<sup>3</sup>



**Figure 5 :** Performance épuratoire de six systèmes photocatalytiques (E8, E15, S1, S2, S3, S4) pour l'heptane [1, 2]

**NB :** Volume d'enceinte testé à 1m<sup>3</sup>



## Annexe 5 – Influence de la composition de l'air (évaluation de la performance CADR et IP)

Débits d'air épuré CADR et indice de performance IP du FORMALDÉHYDE pour un même épurateur d'air autonome (noté S1)

(en injection individuelle ou au sein de matrice d'air différentes selon les polluants)

La comparaison des deux graphiques (radars), exprimant le CADR (à gauche) et l'IP (à droite), montre une hiérarchisation semblable de la performance épuratoire pour des COVs traités avec le même dispositif photocatalytique (dans cet exemple: le système S1 pour éliminer le formaldéhyde HCHO). Par ordre décroissant :

-La performance épuratoire de S1 est la meilleure pour le traitement du formaldéhyde seul ou du formaldéhyde combiné avec d'autres polluants spécifiques d'une ambiance en air intérieur de type « Standard ».

-Le système S1 est presque deux fois moins performant pour traiter le formaldéhyde présent dans une ambiance de type « Air urbain » ou de type « Bâtiment bois ».

-La performance de l'épurateur S1 la moins efficace pour épurer du formaldéhyde se constate dans une ambiance intérieure de type « milieu hospitalier ».

Par conséquent, la composition de la matrice Air influence la performance épuratoire d'un système photocatalytique. Dans cet exemple avec le système S1, la hiérarchisation des performances est homogène quelle que soit l'approche testée par le CADR ou par l'IP :

**HCHO seul injecté = HCHO matrice Air/standard > HCHO matrice Air/urbain = HCHO matrice bâtiment bois > HCHO matrice hospitalier.**

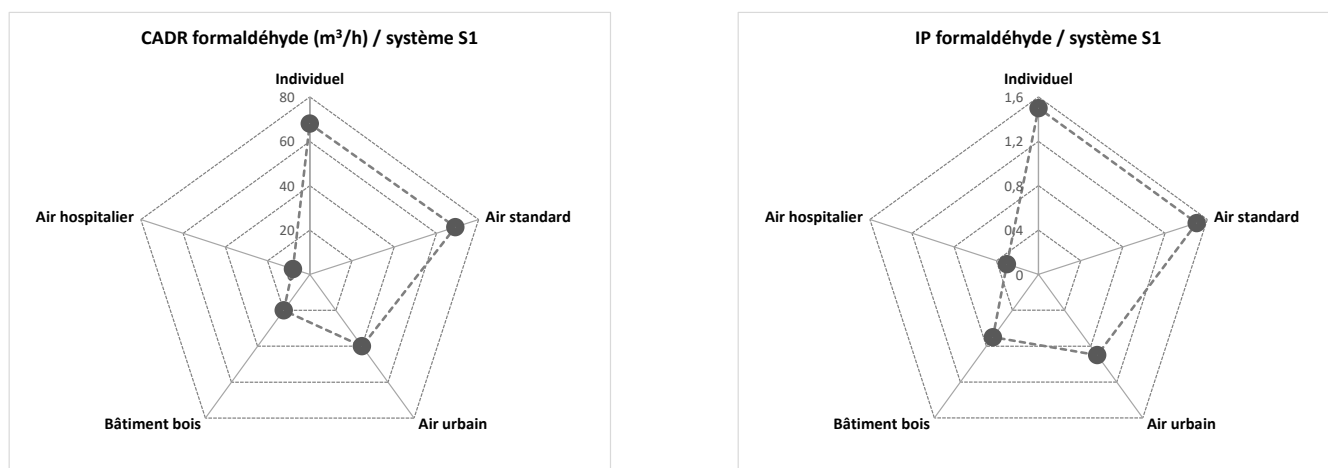


Figure 6 : Comparaison des débits d'air épuré (CADR) et de l'indice de performance (IP) du système S1 pour le formaldéhyde (mesuré en injection seule ou en injection dans 4 matrices d'air différentes) [2]

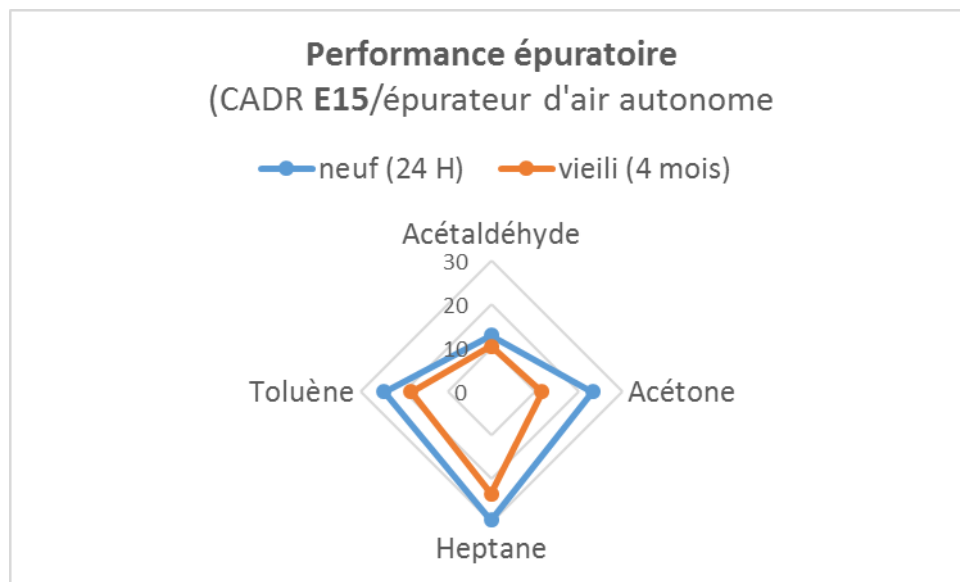
**NB :** Volume d'enceinte testé à 40 m<sup>3</sup> ; « individuel » signifie que le formaldéhyde est injecté seul dans l'enceinte ; « Air standard », « Air-urbain », « Air-Bâtiment bois », « Air-hospitalier » caractérisent quatre modèles différents de matrices gazeuses en compositions de COVs (du formaldéhyde est présent dans chaque matrice<sup>60</sup>).

<sup>60</sup> En rappel, les descriptions de composition de matrices gazeuses sont notées en notes de bas de page (36 à 39).

## Annexe 6 – Influence du vieillissement

Débits d'air épuré CADR pour différents polluants  
(acétaldéhyde, acétone, heptane, toluène présents dans l'air individuellement)

avec l'épurateur d'air autonome E15 à l'état neuf ou vieilli



**Figure 7 :** Comparaison entre le fonctionnement neuf et vieilli à 4 mois des performances du système E15 (selon le CADR) pour quatre polluants injectés individuellement (acétaldéhyde, acétone, heptane, toluène) [1]

**NB :** Volume d'enceinte testé à 1m<sup>3</sup>

