

## Notes techniques

# ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE FILTRATION D'AÉROSOLS DE TROIS TECHNOLOGIES D'ÉPURATEURS D'AIR INTÉRIEUR

Face au recours grandissant aux épurateurs d'air intérieur, proposés pour l'élimination de bioaérosols dans le contexte de pandémie de SARS-CoV-2, l'INRS a conduit une étude pour mesurer les performances de trois technologies, parmi les plus répandues sur le marché. Les tests réalisés en laboratoire ont porté sur l'évaluation de l'efficacité des appareils vis-à-vis des aérosols inertes sur le plan biologique et des polluants gazeux susceptibles d'être émis dans l'air. Ils mettent en évidence des résultats contrastés et révèlent notamment une émission d'ozone importante pour l'un d'entre eux.

DENIS  
BÉMER,  
FABIEN  
GÉRARDIN  
INRS,  
département  
Ingénierie  
des procédés

### Qualité de l'air intérieur des locaux tertiaires

Les immeubles de bureaux (locaux de travail et recevant du public) sont, relativement au temps passé sur place, le second lieu après l'habitat. Ils sont essentiellement fréquentés par les personnes travaillant dans le secteur tertiaire, mais aussi par des travailleurs d'autres secteurs d'activité (intervenants extérieurs : ménage, gardiennage, maintenance...). À ce jour, l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) évalue à environ 20 millions le nombre de travailleurs salariés et indépendants qui occupent un emploi dans le secteur tertiaire, soit 74 % de la population active [1]. La qualité de l'air à l'intérieur (QAI) des locaux tertiaires est donc un paramètre important à prendre en compte, d'autant plus en période de pandémie virale. Différentes sources d'émission peuvent être à l'origine de la présence des contaminants de l'air intérieur : des sources propres au bâti, à son environnement extérieur, à ses équipements, à son entretien ou à l'activité de ses occupants. La qualité de l'air intérieur est ainsi conditionnée par la pollution en provenance de sources multiples intérieures et de l'air extérieur, telle que détaillée dans une étude de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) publiée en 2019 [2].

Les polluants de l'air intérieur sont présents sous forme gazeuse et particulaire (aérosols). Parmi les polluants gazeux, on retrouve classiquement l'ozone, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les composés organiques volatils (COV). L'Anses a ciblé

douze polluants gazeux d'intérêt présents dans l'air intérieur : formaldéhyde, monoxyde de carbone, benzène, toluène, naphthalène, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, acide cyanhydrique, dioxyde d'azote, acroléine, acétaldéhyde et éthylbenzène [2].

En ce qui concerne les aérosols, on distingue ceux formés à partir des particules d'origine biologique (bioaérosols) de ceux constitués d'autres particules en suspension, sans origine biologique. Les bioaérosols sont constitués de l'ensemble des micro-organismes et des vecteurs particuliers d'origine biologique. Ils sont omniprésents et très divers ; ils sont composés de bactéries (dont certaines produisent des endotoxines), de virus, de moisissures (dont certaines produisent des mycotoxines), d'allergènes provenant d'animaux, d'insectes ou des pollens. Outre le risque infectieux, certains de ces composés peuvent également induire des risques immuno-allergiques et toxiques.

Les particules non biologiques proviennent des activités soit « internes » (activité humaine, machines), soit « externes » (pollution environnementale) à la situation de travail. Les particules fines définies par les PM<sub>2.5</sub> (matière particulaire de diamètre aérodynamique < 2,5 µm) et ultrafines (particules de diamètre < 0,1 µm ou PUF) sont particulièrement suivies, car responsables de différentes pathologies, dont les maladies cardiovasculaires [3].

### Assainissement de l'air intérieur

Pour les locaux de travail à pollution non spécifique, comme les bureaux, les locaux de restauration,

## RÉSUMÉ

Dans le cas des locaux de travail à pollution non spécifique ne disposant pas de ventilation mécanique, où le renouvellement de l'air est uniquement assuré par l'ouverture de fenêtres, les épurateurs d'air dits « autonomes » peuvent constituer un moyen complémentaire d'amélioration de la qualité de l'air. Dans le contexte actuel de pandémie liée au virus Sars-CoV-2, ces appareils trouvent de très nombreuses applications, mais suscitent également autant d'interrogations

quant à leurs performances. C'est pour cela que l'INRS s'est équipé en 2022 d'une cabine d'essai permettant l'étude de ces épurateurs vis-à-vis des particules aéroportées (aérosols), dont les aérosols biologiques (bioaérosols). Dans un premier temps, des appareils exploitant trois principes d'épuration ont été testés vis-à-vis de particules (non biologiques) de chlorure de sodium : un épurateur à filtre HEPA, un appareil associant filtration / photocatalyse / plasma froid,

et un ioniseur. Les mesures ont permis de déterminer le débit d'air épuré des appareils et ont mis en évidence l'émission d'ozone et d'oxydes d'azote par le dispositif (filtration/photocatalyse / plasma froid). Cette méthode d'évaluation, établie préalablement pour des aérosols inertes, sera adaptée et déclinée pour les aérosols biologiques, ainsi que pour les composés organiques volatils (COV).

## EVALUATION OF THE AEROSOL FILTRATION PERFORMANCE OF THREE INDOOR AIR PURIFIER TECHNOLOGIES

*In the case of work spaces with non-specific pollution sources not having mechanical ventilation, or where air change is ensured only by opening windows, "free-standing" air purifiers can be another means of improving air quality. Amidst the current Sars-CoV-2 virus pandemic, these devices have numerous applications, but raise as many concerns about their performance. Therefore, in 2022, INRS*

*acquired a test booth to study how these purifiers perform with regard to airborne particles (aerosols), including biological aerosols (bioaerosols). First, devices using three purification principles were tested regarding non-biological sodium chloride particles: a HEPA filter purifier, a device associating filtration / photocatalysis / cold plasma, and an ioniser. The measurements served*

*to determine the clean air delivery rate of the devices and highlighted the emission of ozone and nitrogen oxide by the mechanism (filtration / photocatalysis / cold plasma). This assessment method, previously established for inert aerosols, will be adapted and designed for biological aerosols, as well as for volatile organic compounds (VOCs).*

de commerce, etc., offrant plus de 15 m<sup>3</sup> par occupant, l'article R. 4222-5 du Code du travail<sup>1</sup> autorise le renouvellement de l'air intérieur uniquement par la ventilation naturelle, obtenue par l'ouverture de fenêtres ou autres ouvrants donnant sur l'extérieur. Mais le recours à la seule ventilation naturelle pose différents problèmes, comme la consommation énergétique en période hivernale, l'inconfort thermique, et l'introduction non maîtrisée d'air extérieur, qui peut être de mauvaise qualité (pollution atmosphérique). Dans ce cas, le recours aux épurateurs d'air peut être une solution d'amélioration de la qualité de l'air ; ils peuvent également être préconisés en complément de la ventilation mécanique.

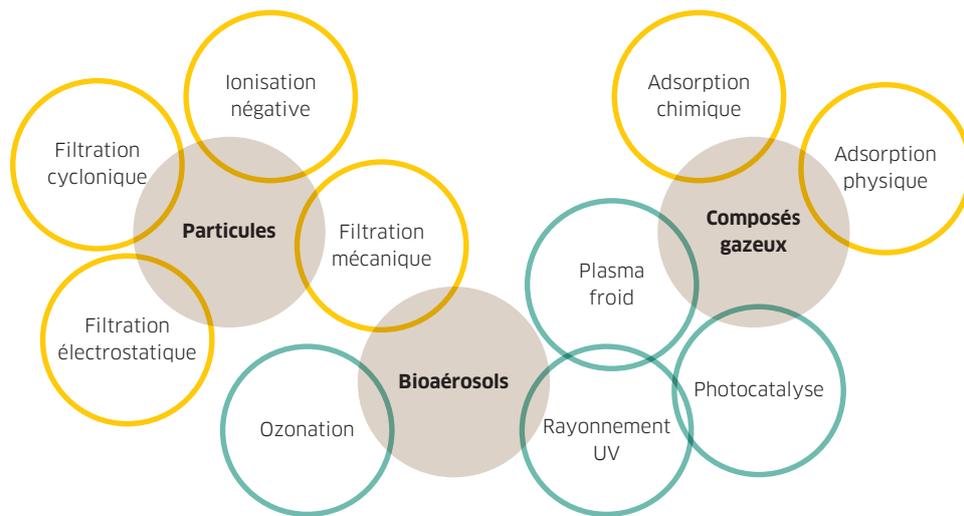
Ces épurateurs, qui ne nécessitent en général aucun raccordement autre qu'électrique, peuvent être mis en œuvre rapidement dans la plupart des situations et permettent de réduire plus ou moins rapidement les concentrations en particules de l'air [4] (Cf. *Focus en fin d'article*). Ces dispositifs autonomes d'assainissement de l'air intérieur sont présents sur le marché national depuis de nombreuses années. Destinés à l'origine au traitement des COV et des aérosols non biologiques, ils ont récemment été proposés pour

l'élimination de bioaérosols. En effet, dans le contexte de pandémie liée au virus Sars-CoV-2, ces appareils trouvent de très nombreuses applications, mais leurs performances suscitent également des interrogations. L'Anses a réalisé en 2017 un état de l'art sur les différentes techniques d'épuration de l'air [5]. Ces travaux mettent en évidence la nécessité de s'intéresser :

- aux émissions primaires de composés, intentionnelles ou non, liées au fonctionnement du dispositif (par exemple : ozone émis par les ozonateurs, mais également par les plasmas froids) ;
- à la formation de sous-produits liée à la dégradation incomplète des polluants (par exemple : formation de formaldéhyde du fait d'une dégradation incomplète de l'éthanol par photocatalyse) ;
- à la formation de polluants secondaires liée aux interactions entre les substances générées par l'épurateur et les polluants présents dans les environnements intérieurs (par exemple : formation de particules secondaires du fait de réactions entre de l'ozone émis par un épurateur à plasma et des terpènes présents dans l'air intérieur) ;
- aux émissions secondaires liées aux interactions physiques, chimiques ou biologiques entre les



FIGURE 1 →  
Techniques  
d'épuration mises  
en œuvre dans les  
épurationneurs.



|             |  |
|-------------|--|
| ÉPURATEUR 1 | Filtre HEPA - H14; 5 niveaux de débit réglables  |
| ÉPURATEUR 2 | Filtre moyenne efficacité; photocatalyse; plasma froid; lampe UV; 3 niveaux de débit réglables |
| ÉPURATEUR 3 | Ioniseur, 24 pointes alimentées en tension négative (-5 kV)                                    |

↑ TABLEAU 1  
Caractéristiques  
des épurationneurs  
d'air étudiés.

polluants piégés dans l'épurationneur et des polluants de l'air intérieur (par exemple : réactions de polluants de l'air intérieur avec de l'ozone piégé dans le filtre à charbon actif).

Un recensement récent des épurationneurs disponibles sur le marché a mis en évidence une arrivée massive de nouveaux systèmes, notamment depuis le début de

la crise sanitaire [6]. La plupart de ces appareils sont destinés au traitement des (bio)aérosols et des COV. Leur fonctionnement repose sur des techniques séparatives et/ou d'oxydation (Cf. Figure 1) et la majorité d'entre eux associe plusieurs techniques.

L'INRS s'est doté en 2022 d'une cabine, afin d'étudier les performances des épurationneurs d'air. Des essais ont été conduits à partir de trois appareils du commerce utilisant trois des techniques les plus employées actuellement pour l'épuration de l'air intérieur : la filtration des particules, la filtration combinée à la photocatalyse et plasma froid, et l'ionisation. Ces essais ont porté uniquement sur la mesure de leurs performances vis-à-vis des aérosols inertes sur le plan biologique et des polluants gazeux susceptibles



## ENCADRÉ 1

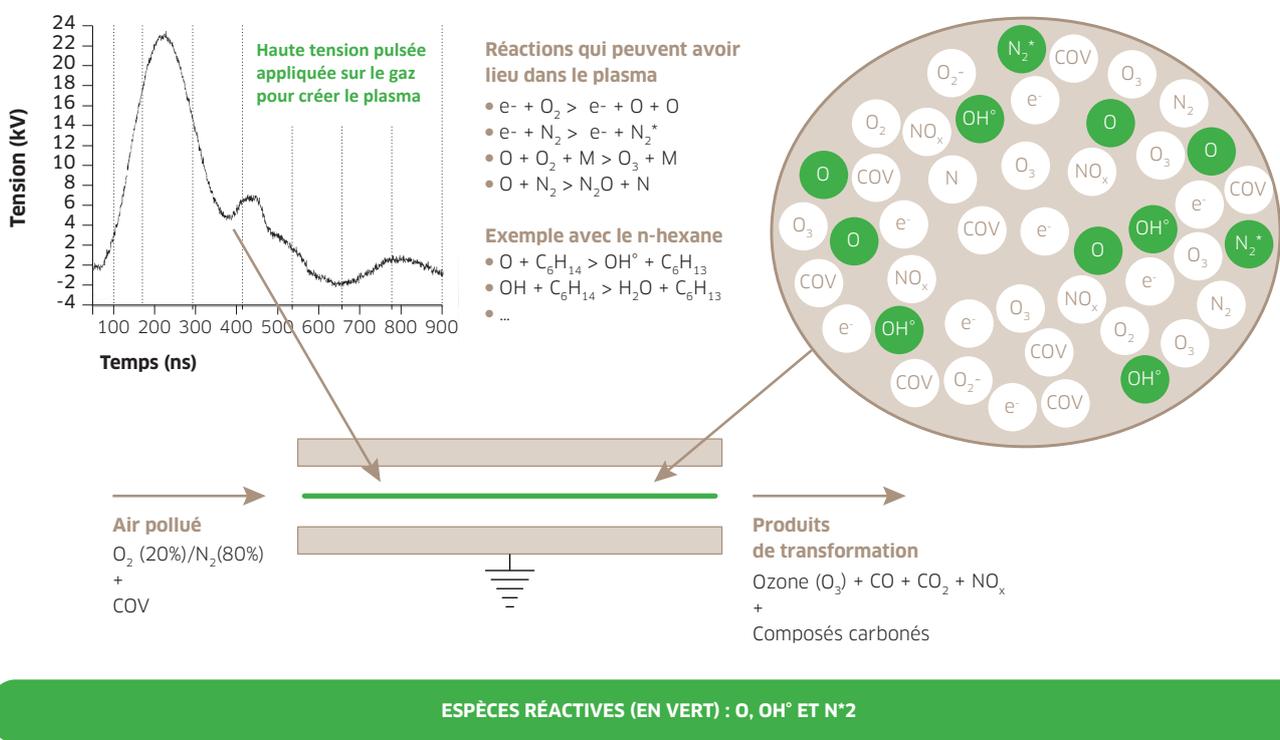
## PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES RENCONTRÉES DANS LES ÉPURATEURS

## Filtration

Un média, le plus souvent constitué de fibres microniques, est traversé par le flux d'air chargé en particules. Celles-ci se fixent aux fibres plus ou moins efficacement en fonction de leur taille et d'autres paramètres de fonctionnement, notamment la vitesse de passage du flux d'air [8].

## Principe du plasma froid

Le plasma froid ou plasma à pression atmosphérique est produit par une décharge électrique à travers un gaz, en l'occurrence de l'air dans cette étude. Lorsque la tension est suffisamment élevée, une proportion variable des molécules qui composent l'air va s'ioniser et donner naissance à des espèces réactives. Ces espèces vont intervenir dans le processus d'oxydation de polluants présents dans l'air et conduire à une minéralisation partielle ou totale des polluants. La production d'ozone, d'oxydes d'azote et de sous-produits est très souvent associée à la formation d'un plasma froid (Cf. Figure E1).



↑ FIGURE E1 Composition d'un « plasma froid ».

(SUITE DE L'ENCADRÉ PAGE SUIVANTE)

d'être émis. Par la suite, l'étude portera également sur le traitement des COV et le suivi des éventuels composés de dégradation susceptibles d'être produits par certains systèmes, comme la photocatalyse ou les plasmas froids [7].

## Approche méthodologique

Trois types d'épurateur, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1, ont été testés. Les principes des différentes technologies mises en place dans les épurateurs retenus dans le cadre de cette étude sont présentés dans l'Encadré 1. Les essais ont consisté à déterminer le débit d'air

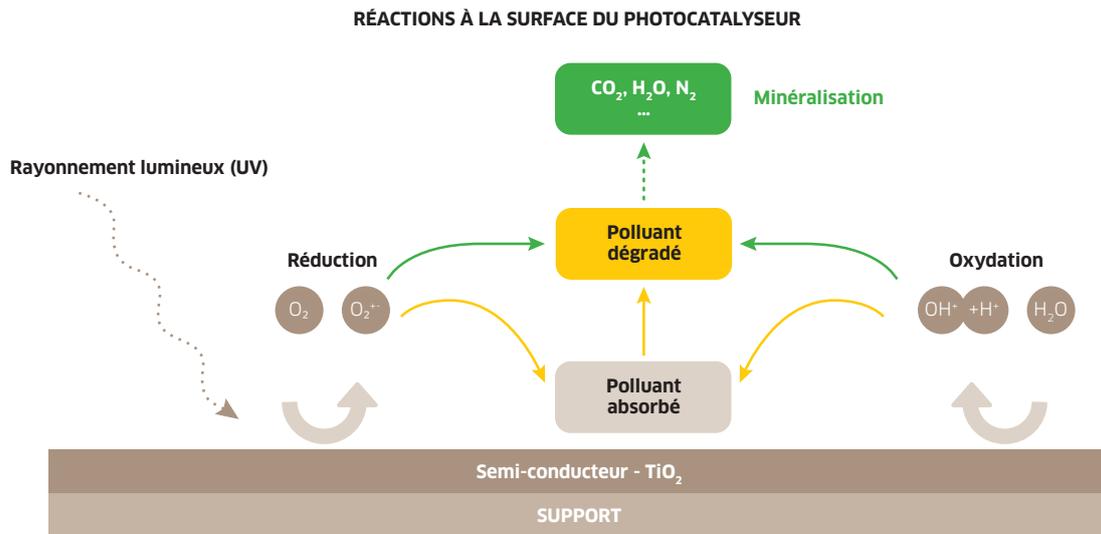
épuré des appareils Q<sub>AE</sub> (ou *clean air delivery rate* : CADR), ainsi que l'efficacité de filtration pour les appareils munis de filtres (épurateurs n<sup>os</sup> 1 et 2). Le débit d'air épuré (Q<sub>AE</sub>) est simplement égal au produit du débit d'air de l'appareil par son efficacité de séparation. Par exemple, un épurateur de débit 100 m<sup>3</sup>/h avec une efficacité de 50 % présentera le même Q<sub>AE</sub> qu'un épurateur de débit 50 m<sup>3</sup>/h avec une efficacité de 100 %. La concentration en ozone (O<sub>3</sub>) et en oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) a aussi été contrôlée pour les appareils susceptibles d'en produire (appareils n<sup>os</sup> 2 et 3). Les mesures ont été réalisées dans une cabine aux parois métalliques peintes, de volume V<sub>c</sub> = 17,4 m<sup>3</sup>



ENCADRÉ 1 (SUITE)

**Principe de la photocatalyse**

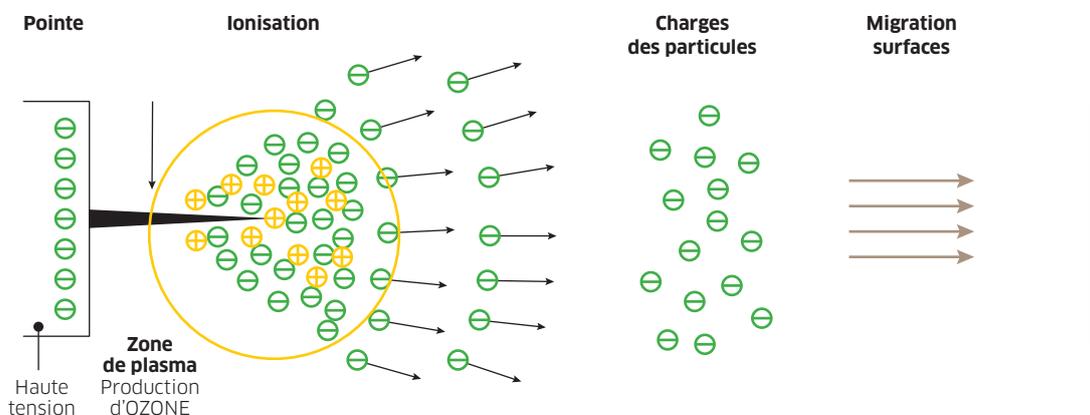
La photocatalyse est basée sur l'excitation d'un semi-conducteur par l'absorption d'un rayonnement, le plus généralement ultraviolet, entraînant des modifications électroniques au sein de la structure du semi-conducteur. Il y a ainsi formation de radicaux superoxydes ( $O_{2ads}^{\bullet-}$ ) et hydroxyles ( $OH^{\bullet}$ ), à l'origine de réactions d'oxydoréduction des composés adsorbés à la surface du catalyseur. Ces réactions vont participer à une minéralisation partielle ou totale des polluants. La formation de sous-produits est très probable lors du processus de décomposition photocatalytique des polluants gazeux (Cf. Figure E2).



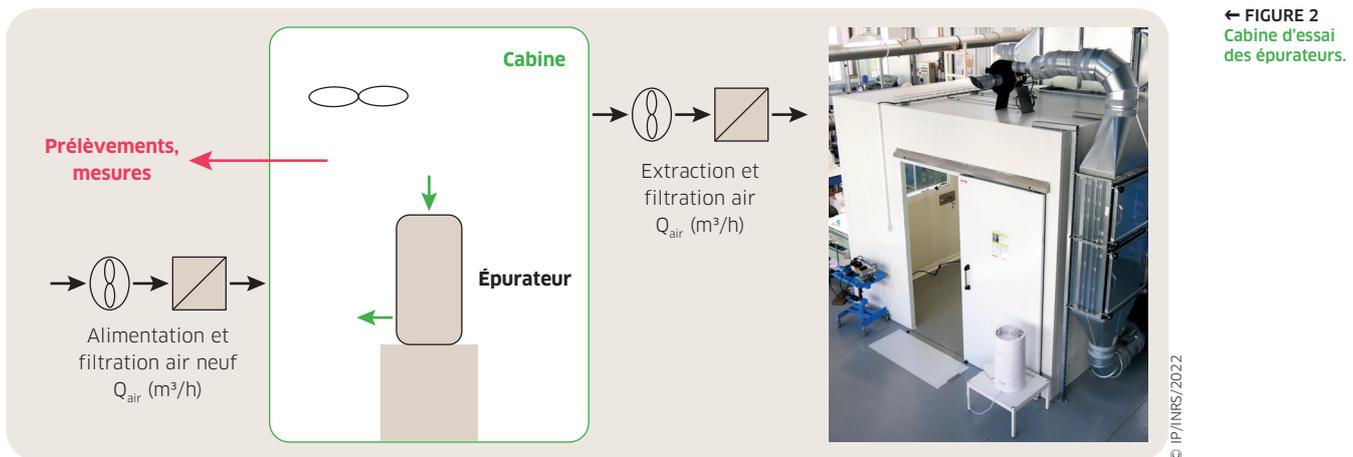
↑ FIGURE E2 Réactions à la surface du photocatalyseur.

**Ioniseurs**

Des pointes métalliques alimentées en haute tension, généralement négative, ionisent les molécules de l'air. Les ions produits vont se fixer sur les particules aéroportées, ce qui a pour effet d'accroître considérablement leur migration vers les différentes parois du local et, de ce fait, leur élimination de l'air ambiant. Le plasma produit par la haute tension est susceptible de générer de l'ozone et des espèces réactives (Cf. Figure E3).



↑ FIGURE E3 Principe de fonctionnement d'un ioniseur.



← FIGURE 2  
Cabine d'essai  
des épurateurs.

(Cf. Figure 2), comportant une arrivée d'air filtré (filtre H14 et charbon actif) et une reprise réglable en débit permettant de contrôler la pression intérieure. Un ventilateur placé à l'intérieur assure le mélange et l'homogénéité des concentrations.

### Évaluation en laboratoire

#### Épuration des particules

- Mesure du débit d'air épuré ( $Q_{AE}$ ) : le débit d'air épuré peut être déterminé de deux manières ; soit par la mesure de l'efficacité de séparation du système E et de son débit de ventilation Q, soit par la mesure de la décroissance de la concentration en particules de l'air de la cabine au cours du temps. Ces deux méthodes sont décrites dans l'Encadré 2.

La première méthode est décrite dans la norme NF B 44-200 [10]. Elle consiste à connecter l'épurateur à un banc d'essai, afin d'établir un bilan des concentrations en particules à l'amont et à l'aval à partir duquel l'efficacité E est déterminée. Le débit de ventilation Q est également mesuré, ce qui permet la détermination du  $Q_{AE} = E \times Q$ . Cette méthode a néanmoins pour inconvénient de nécessiter la fabrication de pièces d'adaptation de l'épurateur au banc d'essai ; cette opération est souvent contraignante du fait des géométries parfois complexes des dispositifs. C'est pourquoi il a été décidé de mettre au point une méthode simplifiée, s'inspirant de cette méthode normalisée, mais utilisant la cabine d'essai et ne nécessitant pas la fabrication de pièce d'intégration de l'épurateur au banc de test (Cf. Fig. E4, Encadré 2). La deuxième méthode fait appel à la mesure de la décroissance au cours du temps de la concentration des particules dans la cabine, dans deux configurations testées séparément : avec et sans l'épurateur en fonctionnement (Cf. Encadré 2). Cette méthode est encore plus simple sur le plan expérimental, car elle ne nécessite qu'une mesure de la concentration à l'intérieur de la cabine.

Pour les deux méthodes, le suivi de la concentration en particules en fonction de leur taille, comprise dans un intervalle [0,25 – 15  $\mu\text{m}$ ], est effectué au



© IP/NRS/2022

moyen d'un compteur optique (COP Grimm 1.109) ; et la fraction ultrafine (taille comprise dans l'intervalle [10 – 300 nm]) est mesurée avec un compteur à noyau de condensation (CNC TSI 3007).

- Mesure du débit d'épuration : le débit Q de l'appareil peut être déterminé de manière indirecte à partir du débit d'air épuré  $Q_{AE}$  et de l'efficacité E (comprise entre 0 et 1) :  $Q = Q_{AE} / E$ . Le débit peut être aussi déterminé de manière directe par mesure de la vitesse d'air ou par débitmétrie dans une installation permettant de connecter l'épurateur à l'amont et à l'aval (méthode d'essai normalisée [10]).

#### Émissions de polluants

Le suivi des émissions en gaz  $\text{NO}_x$  et  $\text{O}_3$  a été effectué pour les appareils n°s 2 et 3, l'épurateur n° 1 ne comportant qu'un filtre à particules.

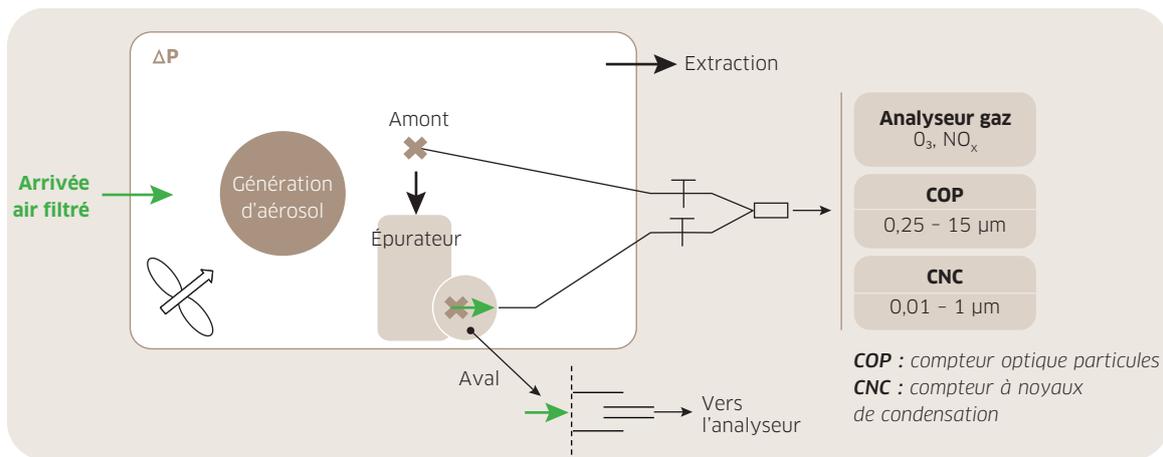
- **Épurateur n°2** : les concentrations en ozone et en oxydes d'azote  $\text{NO}_x$  ont été mesurées à l'intérieur

Exemple  
d'épurateur  
installé dans  
une salle  
de réunion.



**ENCADRÉ 2**  
**MÉTHODES DE DÉTERMINATION DU DÉBIT D'AIR ÉPURÉ  $Q_{AE}$**   
**ET DE L'EFFICACITÉ DE FILTRATION**

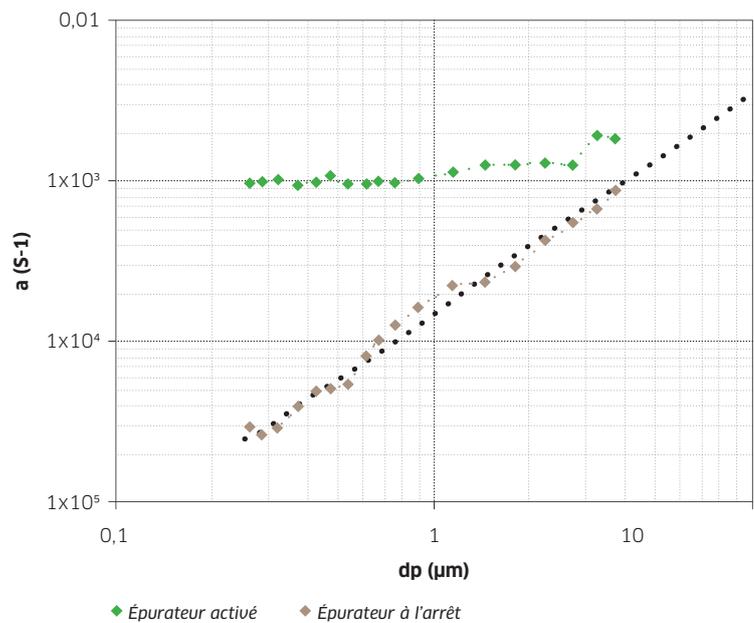
Un « zéro particule » est tout d'abord effectué en faisant fonctionner la cabine environ 20 minutes à pression positive (15 Pa). Un aérosol de chlorure de sodium (NaCl) est ensuite généré dans la cabine, par pulvérisation d'une solution saline à 0,5 % pendant une dizaine de secondes, afin d'amener la concentration en particules à 80 % de la limite de saturation du compteur optique utilisé pour la mesure de la concentration et de la distribution granulométrique des particules (COP Grimm 1.109, [0,25 - 15 µm]). Un compteur à noyaux de condensation (CNC TSI 3007) est également utilisé afin de déterminer la fraction ultrafine des particules (10 - 300 nm) (Cf. Figure E4). Le ventilateur de mélange est activé durant toute la durée des mesures.



↑ FIGURE E4 Prélèvement amont/ aval vers les systèmes de mesure (COP : Grimm 1.109 et CPC : TSI 3007 et analyseurs gaz).

**Mesure du  $Q_{AE}$  par décroissance de la concentration**

La décroissance de la concentration en nombre des particules ( $C_p$ ) est suivie au moyen des deux instruments (COP et CNC) dans les deux configurations testées, à savoir avec et sans l'épurateur en fonctionnement. Les pentes de décroissance du logarithme népérien de la concentration  $\ln(C_p)$ , respectivement établies avec épurateur ( $a$ ) et sans épurateur ( $a_0$ ) (Cf. Figure E5), permettent la détermination du  $Q_{AE}$  selon la relation :  $Q_{AE} = -V_c \cdot (a - a_0)$ , où  $V_c$  est le volume de la cabine. Les pentes  $a$  et  $a_0$  étant définies pour chaque classe granulométrique des appareils, le débit d'air épuré  $Q_{AE}$  est également dépendant du diamètre des particules.



↑ FIGURE E5 Pentas de décroissance de la concentration en fonction du diamètre des particules (COP Grimm 1.109).

(SUITE DE L'ENCADRÉ PAGE SUIVANTE)

## ENCADRÉ 2 (SUITE)

**Mesure de l'efficacité par mesure des concentrations amont/aval**

L'efficacité de filtration  $E$  peut être déterminée par la mesure des concentrations à l'amont et l'aval de l'épurateur.

La concentration amont est établie à partir d'un point de mesure situé à l'intérieur de la cabine et la concentration aval est déterminée par prélèvement au niveau des zones de soufflage de l'air épuré (Cf. Figure E5). Afin d'éviter tout risque de contamination de l'air échantillonné à l'aval par l'air intérieur, la sonde de prélèvement est placée à l'intérieur d'un tube métallique (diamètre : 5 cm), accolé à la paroi de soufflage.

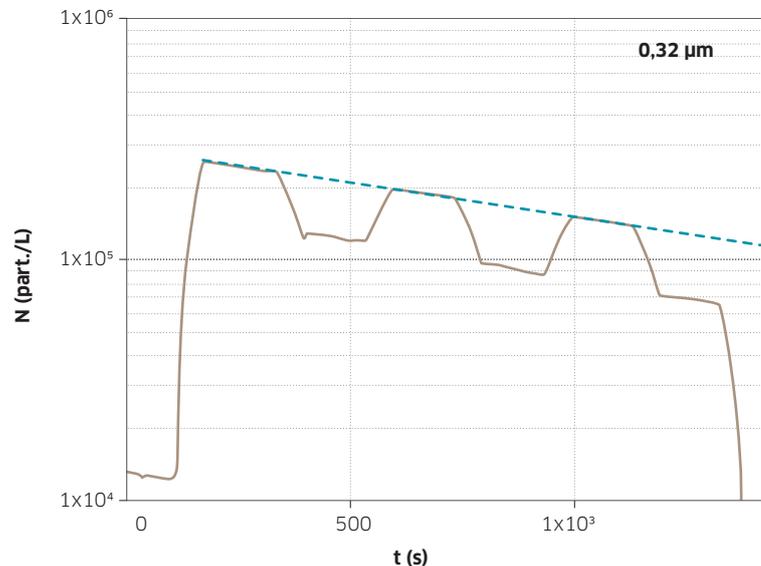
Trois séquences de mesure amont (intérieur de la cabine) et aval (sortie de l'épurateur) sont effectuées. Du fait de la décroissance au cours du temps de la concentration, la concentration amont moyenne est calculée par extrapolation, aux périodes de mesure des concentrations aval ; un exemple est représenté sur la Figure E6.

L'efficacité moyennée sur les trois séquences  $i = 1$  à 3 est alors donnée par la relation :

$$E = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 E_i ;$$

$$\text{avec : } E_i = 1 - \frac{C_{s_i}}{C_{e_i}}$$

$C_{s_i}$ ,  $C_{e_i}$  : les concentrations en nombre aval/amont déterminées pour chaque diamètre de particule  $d_p$ .



↑ FIGURE E6 Exemple montrant trois séquences de mesure des concentrations amont/aval. Concentration amont calculée aux périodes de mesure de la concentration aval par extrapolation. Exemple donné pour le diamètre de particule  $d_p = 0,32 \mu\text{m}$ .

de la cabine pour différents régimes du ventilateur. Un spectromètre d'absorption UV 254 nm (Thermo Scientific 49i) a été utilisé pour la mesure d'ozone, et un analyseur basé sur la chimiluminescence (Ecotech-Serinus 40) pour le monoxyde et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ). Le suivi de l'évolution de la concentration des gaz au cours du temps a été réalisé avec un débit d'air neuf réglé à  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , en maintenant l'homogénéisation par le ventilateur de mélange.

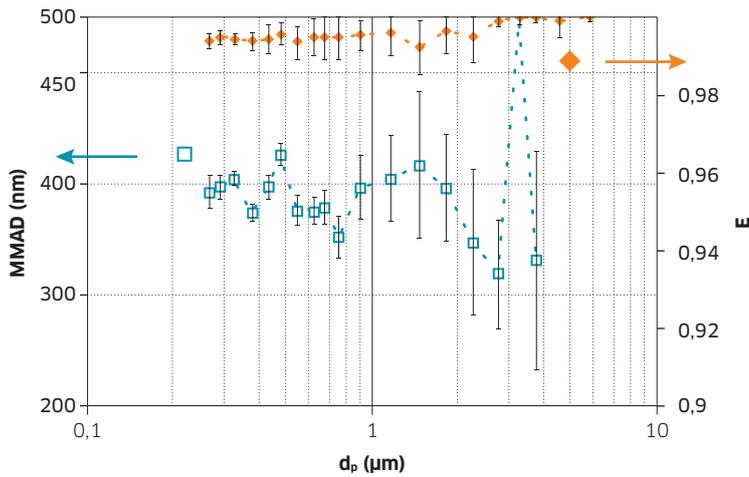
• **Épurateur n°3** : La mesure de la densité d'ions produite par l'ioniseur a été confiée au Laboratoire de physique des gaz et plasmas (LPGP, Saclay). L'ioniseur est placé dans une enceinte conductrice dont le courant de fuite est mesuré. La distance entre les pointes de l'ioniseur et la paroi de l'enceinte est un paramètre important à prendre en compte, car elle influe fortement sur le débit d'ions produit. Les mesures ont été effectuées pour une distance de 30 cm, respectant ainsi les préconisations du constructeur. L'émission d'ozone a été établie à partir des courants électriques aux pointes. Enfin, la charge électrique des particules a été mesurée pour l'aérosol d'essai de chlorure

de sodium ( $\text{NaCl}$ ) généré dans la cabine, en recourant à un électromètre pour aérosol (Ioner EL-5030). La charge moyenne des particules est obtenue à partir du courant délivré par l'électromètre et de la concentration en nombre des particules.

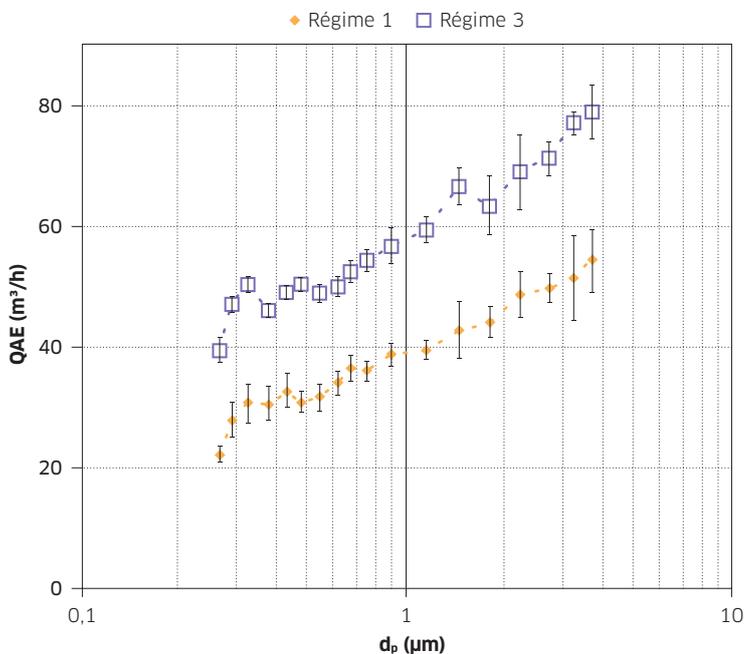
**Résultats****Épurateur n° 1 (essais au régime 2 du ventilateur)**

Les pentes de décroissance de la concentration établies par comptage optique, épurateur activé et arrêté, sont mesurées en fonction du diamètre des particules, ce qui permet de déduire le débit d'air épuré  $Q_{AE}$  (Cf. Figure 3 et Encadré 2). Le  $Q_{AE}$  moyen est établi en ne retenant que le domaine présentant les incertitudes les plus faibles, c'est-à-dire entre  $0,25$  et  $2 \mu\text{m}$  ; il est égal à  $60,3 \text{ m}^3/\text{h}$  au régime 2 du ventilateur. Des mesures effectuées au régime 4 du ventilateur donnent un  $Q_{AE}$  moyen de  $122,6 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'efficacité de filtration ( $E > 99\%$ , Cf. Figure 3) est conforme à celle qu'on peut attendre d'un épurateur muni d'un filtre H14. Pour cet épurateur, le débit d'air épuré est égal au débit de ventilation de l'appareil :  $Q_{AE} = Q$ .





↑ FIGURE 3  $Q_{AE}$  et efficacité E de l'épurateur n° 1 en fonction du diamètre des particules (régime 2 du ventilateur).



↑ FIGURE 4 Débits d'air épuré  $Q_{AE}$  de l'épurateur n° 2, établis aux régimes 1 et 3 du ventilateur.

Avec cet épurateur, la diminution théorique attendue de la concentration de particules, établie pour une pièce de 60 m<sup>3</sup> (hypothèse d'un mélange parfait), pour une durée d'une heure de fonctionnement, serait donc de 63 % au régime 2 et de 87 % au régime 4 du ventilateur. La technique de séparation de l'épurateur n° 1 n'étant constituée que d'un filtre HEPA, aucune émission de sous-produit ne peut être suspectée, ce qui n'est pas forcément le cas des autres épurateurs.

### Épurateur n° 2

• **Performances vis-à-vis des particules :** le débit d'air épuré  $Q_{AE}$  a été établi pour deux régimes de fonctionnement du ventilateur de l'épurateur (Cf. Figure 4). L'efficacité de filtration de cet appareil (Cf. Figure 5) est caractéristique d'un filtre de



© Gael Kerbaol/INRS/2021

moyenne efficacité, de type F7 selon la classification de la norme sur les filtres à air ISO 16890 [17]. De ce fait, le  $Q_{AE}$  est dépendant du diamètre des particules à la différence de l'épurateur n° 1 muni du filtre HEPA. Il ne sera par exemple que de 40 m<sup>3</sup>/h à  $d_p = 0,3 \mu\text{m}$  ; et de 60 m<sup>3</sup>/h à  $d_p = 1 \mu\text{m}$  (Figure 4, régime 3).

• **Émission de gaz  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  :** les Figures 6 et 7 représentent respectivement l'évolution des concentrations d'ozone et de dioxyde d'azote dans la cabine au cours du temps, pour les deux régimes de fonctionnement de l'appareil, et avec une alimentation de la cabine en air neuf au débit de 50 m<sup>3</sup>/h. Le débit de 50 m<sup>3</sup>/h a été retenu pour simuler la présence de deux personnes dans la cabine, sachant que le débit d'air neuf minimal réglementaire pour une activité de bureau est de 25 m<sup>3</sup>/h par occupant. La concentration d'ozone se situe pour les deux régimes entre les valeurs limites 8h (VLEP = 100 ppb<sup>2</sup>) et à court terme (VLCT = 200 ppb) et donc bien au-dessus de la valeur limite pour la qualité de l'air, fixée par l'OMS à 30 ppb. Les concentrations en  $\text{NO}_2$  sont moindres et de l'ordre de grandeur de la valeur limite définie par la réglementation française pour la qualité de l'air ambiant (40 µg/m<sup>3</sup>, soit ≈ 21 ppb pour la moyenne annuelle) [10]. La valeur guide de la qualité de l'air intérieur VGAI proposée par l'Anses à long terme (> 1 an) est de 20 µg/m<sup>3</sup>, soit 11 ppb ; et la VGAI court terme (1 heure) est de 200 µg/m<sup>3</sup>, soit ≈ 109 ppb [12]. Aucune présence de monoxyde d'azote n'a été relevée au cours des essais.

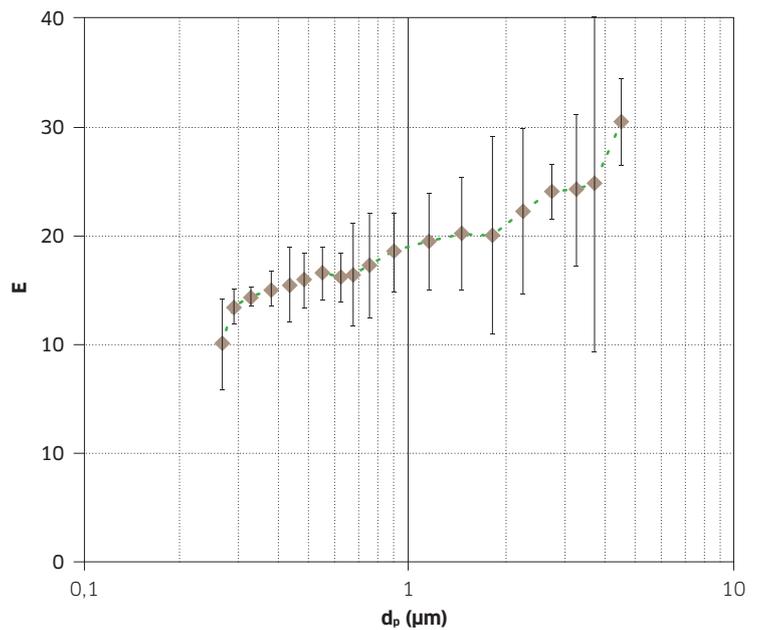
### Épurateur n° 3

L'ioniseur comporte 24 pointes alimentées en tension négative, comprise entre -4,5 et -5,5 kV. Le débit d'air épuré  $Q_{AE}$  représenté sur la Figure 8 est plutôt stable sur la plage granulométrique étudiée, avec cependant une remontée aux diamètres  $d_p > 3 \mu m$ . Bien que plus faible que les débits épurés susceptibles d'être atteints avec les épurateurs à médias filtrants et ventilation mécanique, le  $Q_{AE}$  moyen est loin d'être négligeable (24 m<sup>3</sup>/h).

La charge électrique moyenne portée par les particules a été établie à partir de la concentration totale des particules, obtenue par sommation des valeurs issues du CNC, du COP et du courant mesuré par l'électromètre. La charge moyenne ainsi mesurée est de  $4 \pm 0,5$  charges élémentaires par particule, qui est la charge susceptible d'être obtenue avec un dispositif de charge efficace, fournissant un produit concentration en ions x temps supérieur à  $10^7$  s/cm<sup>3</sup> [13]<sup>3</sup>.

La production d'ozone a été estimée à partir du courant fourni par les ions produits aux pointes de l'ioniseur [14]<sup>4</sup>. Le débit massique d'ozone trouvé est de  $1,2 \times 10^{-3}$  µg/s ; ce qui, toujours pour le débit de ventilation de la cabine de 50 m<sup>3</sup>/h, conduit à une concentration d'ozone en régime stabilisé de 0,09 µg/m<sup>3</sup>, qui se situe très en deçà des valeurs limites. Il est donc possible de considérer que cet ioniseur ne produit pas d'ozone.

Les résultats de mesure sur les trois appareils sont résumés dans le Tableau 2.



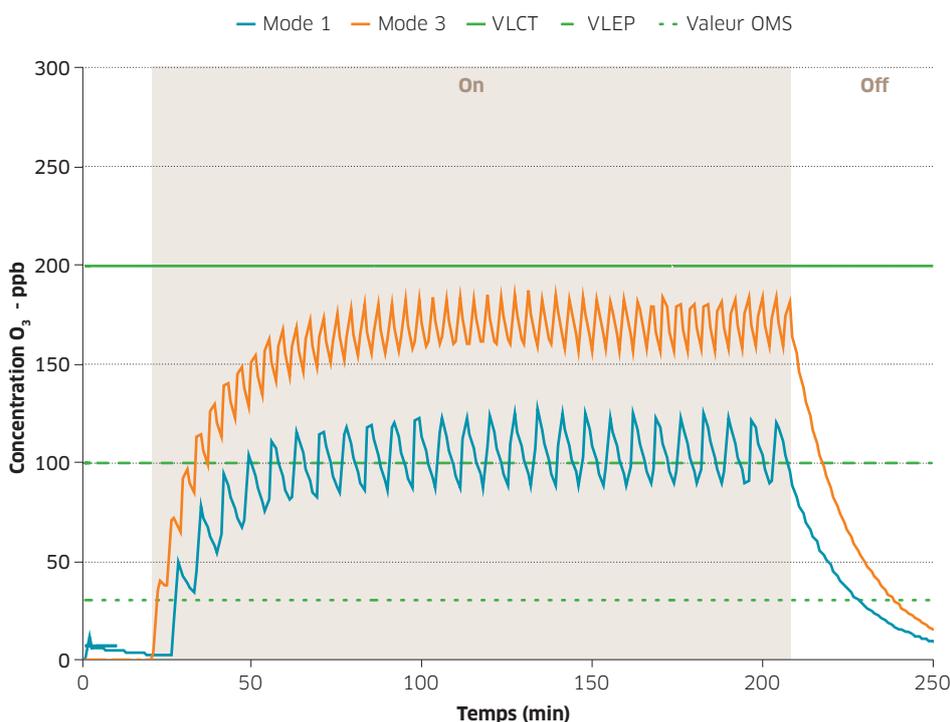
↑ FIGURE 5 Efficacité de filtration de l'épurateur n° 2 en fonction du diamètre des particules, établie au régime 3 du ventilateur.

### Conclusions

Sans être exhaustifs, les travaux conduits dans le cadre de cette étude ont permis de fournir des premiers éléments d'appréciation sur les performances et l'innocuité de trois types d'épurateur :

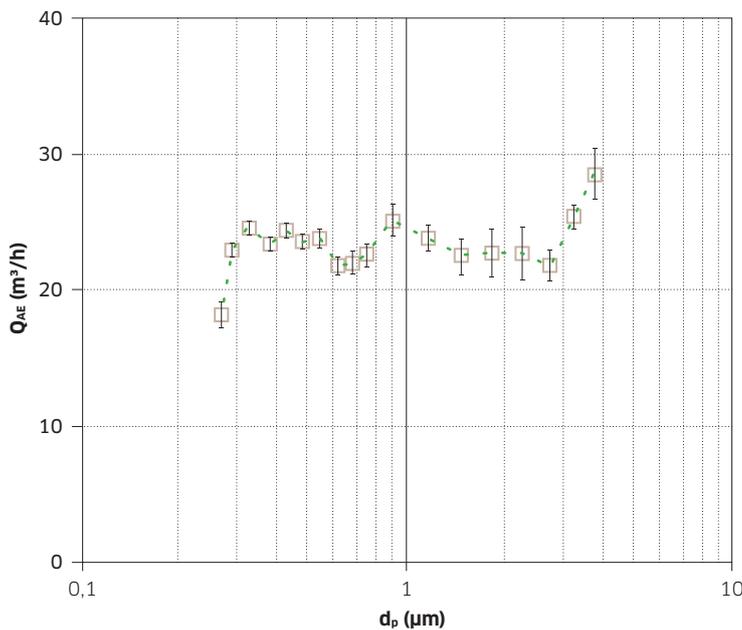
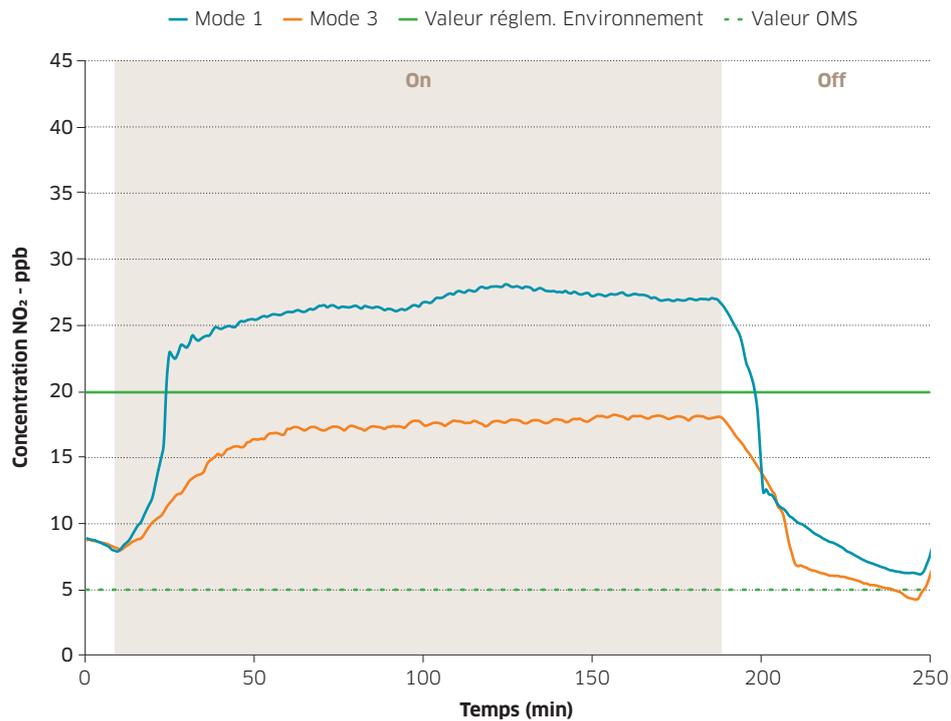
- **Épurateur à média filtrant** : lorsque le média filtrant est mis en place de manière étanche dans le corps de l'appareil, il a été observé qu'un même débit d'air

Évolution de la concentration en ozone dans la cabine vs temps  
 $Q_{air\ neuf} = 50$  m<sup>3</sup>/h - Épurateur JVD



← FIGURE 6 Évolution de la concentration en ozone dans la cabine – épurateur n° 2, activé aux régimes 1 et 3 ; débit d'air de renouvellement = 50 m<sup>3</sup>/h.

**FIGURE 7 →**  
Évolution de la concentration en NO<sub>2</sub> dans la cabine – épurateur n°2 activé aux régimes 1 et 3 ; débit d'air de renouvellement = 50 m<sup>3</sup>/h.



**↑ FIGURE 8**  
Débit d'air épuré Q<sub>AE</sub> du ioniseur, en fonction du diamètre des particules.

épuré Q<sub>AE</sub> pouvait être obtenu avec des qualités de filtration très différentes. Néanmoins, le recours à une filtration de niveau HEPA permet d'obtenir des débits d'air épuré indépendants du diamètre des particules, alors que le Q<sub>AE</sub> peut varier fortement en fonction de la taille des particules avec un filtre de moyenne efficacité. Il est par conséquent nécessaire que le Q<sub>AE</sub> de l'épurateur soit renseigné en fonction du diamètre des particules.

- **Épurateur associant média filtrant/photocatalyse/plasma froid/lampe UV-C** : si l'inactivation des

micro-organismes par le procédé plasma froid est bien connue, les mesures confirment également que ce procédé génère d'importantes quantités d'ozone et, dans une moindre mesure, de NO<sub>2</sub>, pouvant entraîner un dépassement des valeurs limites d'exposition. Ce type d'appareil n'est donc pas recommandé dans les locaux occupés. Si ce type d'appareil a été déployé en l'absence d'occupants, il sera nécessaire de s'assurer que la concentration résiduelle d'ozone est compatible avec une reprise d'activité dans les locaux.

- **Ioniseur** : avec une consommation électrique très faible, l'ioniseur testé présente un débit d'air Q<sub>AE</sub> qui permet d'envisager une élimination efficace des particules de l'air dans la durée, c'est-à-dire sur plusieurs heures de fonctionnement. La production d'ozone de l'appareil testé est insignifiante, mais ce n'est pas forcément le cas de tous ces appareils [15]. L'inconvénient de cette technologie repose sur son principe même qui est l'élimination des particules de l'air sur les parois du bâtiment ; or, ce transfert de contamination n'est peut-être pas souhaitable dans le cas des bioaérosols. Enfin, l'augmentation de la charge électrique des particules est susceptible d'accentuer leur dépôt dans les voies respiratoires, ce qui pourrait paradoxalement renforcer la toxicité de ces aérosols [16].

D'autres technologies sont en cours d'évaluation à l'INRS, notamment les systèmes à UV-C<sup>5</sup>. Leur capacité à éliminer les micro-organismes présents dans l'air sera évaluée à partir de souches de laboratoire, les bactériophages MS-2 et φX-174 ainsi que la bactérie

| ÉPURATEUR | Q <sub>AE</sub> (d <sub>p</sub> = 1 µm)<br>(m <sup>3</sup> /h) | E (d <sub>p</sub> = 1 µm) | q <sub>O<sub>3</sub></sub> (mg/h) | q <sub>NO<sub>2</sub></sub> (mg/h) |
|-----------|--|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1         | régime 2 : 60  | > 0,99                    | 0                                 | 0                                  |
|           | régime 4 : 122   |                           |                                   |                                    |
| 2         | régime 1 : 40  | régime 1 : 0,4            | régime 1 : 10                     | régime 1 : 1,65                    |
|           | régime 3 : 60  | régime 3 : 0,6            | régime 3 : 17,2                   | régime 3 : 2,6                     |
| 3         | 24   | /                         | ε                                 | non mesuré                         |

q<sub>O<sub>3</sub></sub> et q<sub>NO<sub>2</sub></sub> désignent respectivement les débits massiques d'émission en ozone et NO<sub>2</sub>.

↑ TABLEAU 2 Performances des trois appareils.

*Staphylococcus epidermidis*, dont les bioaérosols seront générés dans la cabine, lors d'une étude à venir.

À ce jour et compte tenu de l'avancement des connaissances sur les performances et l'innocuité des épurateurs autonomes disponibles sur le marché, il est conseillé de privilégier des appareils équipés de média filtrant HEPA (H13-H14) mis en place de manière étanche. Un appareil à média filtrant qui délivre un débit d'air épuré adapté au volume de la pièce contribuera à réduire significativement la concentration en (bio)aérosols. Toutefois, ces épurateurs ne sont pas tous équipés de moyens de décontamination de leur média filtrant, il est donc important de prendre en considération la possible exposition des personnes en charge de la maintenance de ces appareils à des agents biologiques.

Enfin, il convient de rappeler que le recours à des épurateurs dits autonomes dans des espaces de travail doit venir en complément d'un apport d'air neuf, en accord avec l'article R. 4222-6 du Code du travail. ●

1. Accessible sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr).
2. Parties par milliard (ppb) : parts per billion).
3. Un dispositif de charge est considéré comme efficace s'il fournit un produit  $N \times [ions] > 107 \text{ s/cm}^3$ .
4. La production d'ozone a été mesurée à l'aide d'un analyseur le permettant, avec une méthode différente de la spectrométrie d'absorption, mais qui confirme la quasi absence d'O<sub>3</sub>.
5. Voir à ce sujet : *Décryptage : Risques photobiologiques liés aux équipements de désinfection UV-C et mesures de prévention*. Hygiène & sécurité du travail, 2022, 268, pp. 5-11. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/decryptage.html>.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] INSEE – *Tableaux de l'économie française*, édition 2020. Accessible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277675?sommaire=4318291>.
- [2] ANSES – *Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments*. Rapport d'expertise, 2019. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-a-une-caracterisation-des-transferts-de-pollution-de-lair>.
- [3] GONG K.W., ZHAO W. ET AL. – Air-pollutant chemicals and oxidized lipids exhibit genome-wide synergistic effects on endothelial cells. *Genome biology*, 2007, 8 (7), article R149.
- [4] SZABADI J., MEYER J. ET AL. – Simultaneous temporal, spatial and size-resolved measurements of aerosol particles in closed indoor environments applying mobile filters in various use-cases. *Journal of aerosol science*, 2022, 160.
- [5] ANSES – *Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes*. Rapport d'expertise collective, 2017. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-a-lidentification-et-analyse-des-differentes-techniques>.
- [6] INRS – *État de l'art sur les systèmes autonomes d'épuration de l'air*. Rapport interne, PROGEPI, 2021 (accessible auprès des auteurs).
- [7] DEBONO O. ET AL. – VOC Ternary mixture effect on ppb level photocatalytic oxidation: removal kinetic, reaction intermediates and mineralization. *Applied catalysis B: environmental*, décembre 2017, 218, pp. 359-369. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.070>.
- [8] THOMAS D., CHARVET A., BEMER D., CHAZELET S. – Filtration des nanoparticules. *Techniques de l'ingénieur*, 2020, ref. J3402V1.
- [9] LIANG Y., YAN W., KE S. ET AL. – Rapid inactivation of biological species in the air using atmospheric pressure nonthermal plasma. *Environmental science & technology*, 2012, 46 (6), pp. 3360-3368. Accessible sur : <https://doi.org/10.1021/es203770q>.
- [10] NORME NF B 44-200 – *Épurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles. Méthode d'essais - Performances intrinsèques*. Afnor, 2016. Accessible sur : [www.boutique-afnor.org](http://www.boutique-afnor.org) (site payant).
- [11] ARTICLE R. 221-1 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT. Accessible sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr).
- [12] ANSES – Valeurs guides de qualité d'air intérieur (VQAI). Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualite-d-air-interieur-vgai>.
- [13] HINDS W.C. – *Aerosol technology* (2<sup>e</sup> éd.). John Wiley & Sons, 1999.
- [14] BORRA J.P. ET AL. – Electrical and chemical consequences of point discharges in a forest during a mist and a thunderstorm. *Applied physics*, 1997, 30, pp. 84-93.
- [15] HOOD E. – Allergies: ionizing air cleaners zapped. *Environmental health perspectives*, 2005, 113 (7), A450.
- [16] AZHDARZADEH M., OLFERT J.S., VEHRING R. ET AL. – Effect of electrostatic charge on oral-extrathoracic deposition for uniformly charged monodisperse aerosols. *Journal of aerosol science*, 2014, 68, pp. 38-45.
- [17] NORME ISO 16890 – *Filtres à air de ventilation générale*. Genève, Iso, 2106. Accessible sur : [www.iso.org](http://www.iso.org).



## FOCUS SUR... Évolution de la concentration en aérosol dans une pièce au cours du temps, avec et sans épurateur

Ce focus vise à illustrer l'influence du fonctionnement d'un épurateur d'air, dont le principe repose sur de la filtration, sur la concentration d'aérosol dans un espace de travail. L'approche consiste à réaliser un bilan en particules dans la pièce afin de réaliser le suivi de l'évolution de la concentration d'un aérosol dans une pièce type (Cf. Figure F1) en fonction du temps. La source de l'aérosol émis dans la pièce n'est pas spécifiée ; elle peut être liée à une activité humaine ou non.

Dans le cas présenté, le bilan en nombre de l'aérosol émis par une personne ou une autre source est réalisé en régime instationnaire selon les données suivantes :

- V [m<sup>3</sup>] : volume de la pièce ;
- C [part.m<sup>-3</sup>] : concentration en aérosol dans la pièce ;
- φ [part.h<sup>-1</sup>] : flux de l'aérosol émis par une personne ou une autre source ;
- Q<sub>ep</sub> [m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>] : débit volumique de l'épurateur ;
- C<sub>ep</sub> [part.m<sup>-3</sup>] : concentration en aérosol en sortie d'épurateur (C<sub>ep</sub> = 0 part.m<sup>-3</sup> si filtre HEPA) ;
- Q<sub>ext</sub> [m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>] : débit volumique de ventilation de la pièce, apport d'air extérieur ;
- C<sub>ext</sub> [part.m<sup>-3</sup>] : concentration en aérosol air extérieur

(C<sub>ext</sub> = 0 part.m<sup>-3</sup> normalement) ;

E est définie comme l'efficacité de filtration de l'épurateur (comprise entre 0 et 1).

$$Q_{AE} \text{ [m}^3\text{.h}^{-1}\text{]} : \text{débit d'air épuré} : Q_{AE} = Q_{ep} \times \frac{(C - C_{ep})}{C} = Q_{ep} \times E$$

$$Q_T \text{ [m}^3\text{.h}^{-1}\text{]} : \text{débit total d'assainissement} : Q_T = Q_{ext} + Q_{AE}$$

En considérant que le volume de la pièce est parfaitement mélangé, le bilan dans l'air de la pièce s'écrit, en régime instationnaire :

$$Q_{ext} \cdot C_{ext} + Q_{ep} \cdot C_{ep} + \phi = Q_{ext} \cdot C + Q_{ep} \cdot C + V \cdot \frac{dC}{dt}$$

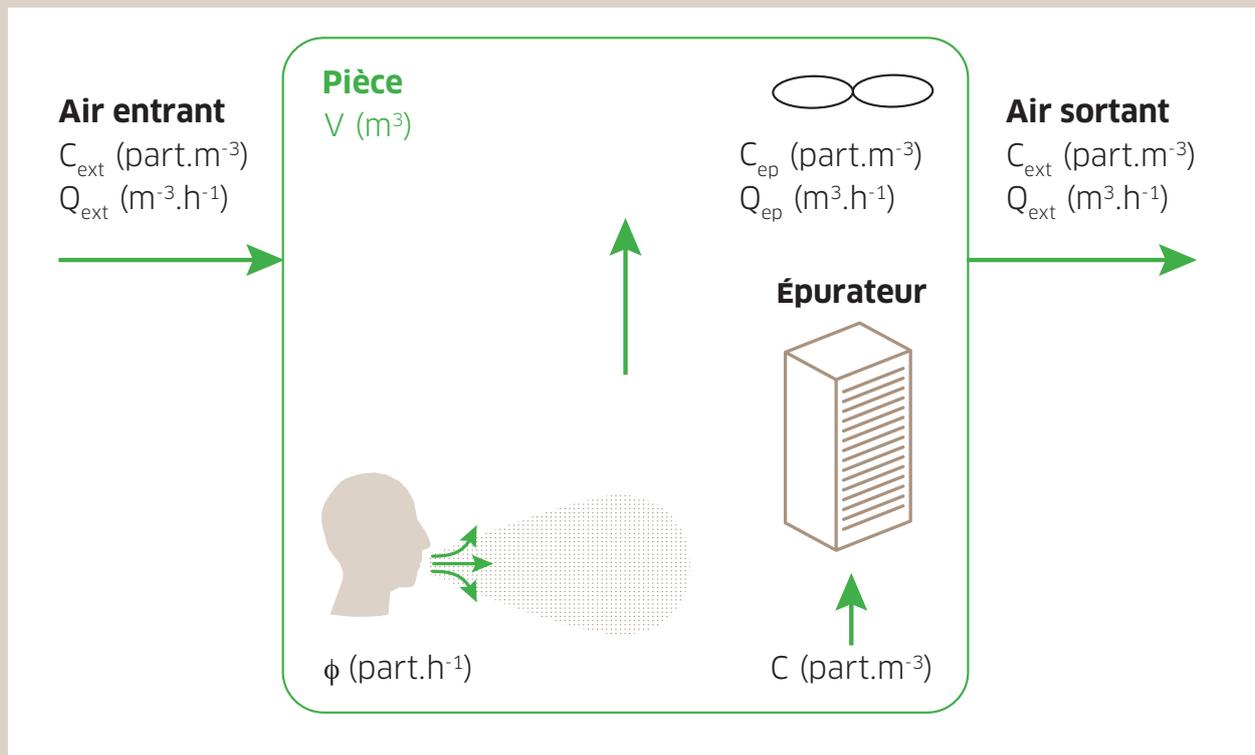
$$Q_{ext} \cdot C_{ext} + \phi = Q_{ext} \cdot C + Q_{ep} \cdot (C - C_{ep}) + V \cdot \frac{dC}{dt}$$

$$Q_{ext} \cdot C_{ext} + \phi = Q_{ext} \cdot C + Q_{ep} \cdot E \cdot C + V \cdot \frac{dC}{dt}$$

$$Q_{ext} \cdot C_{ext} + \phi = (Q_{ext} + Q_{AE}) \cdot C + V \cdot \frac{dC}{dt} = Q_T \cdot C + V \cdot \frac{dC}{dt}$$

La résolution de cette équation conduit à la relation entre la concentration en aérosol et le temps :

$$C(t) = C_{stat} + (C_0 - C_{stat}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$



↑ FIGURE F1 Représentation d'un espace de travail équipé d'un épurateur d'air.

Avec

$$\tau = \frac{V}{Q_{\text{ext}} + Q_{\text{AE}}} = \frac{V}{Q_T}$$

$C_{\text{stat}}$  (part.m<sup>-3</sup>) : la concentration en aérosol dans la pièce en régime permanent, i.e. :

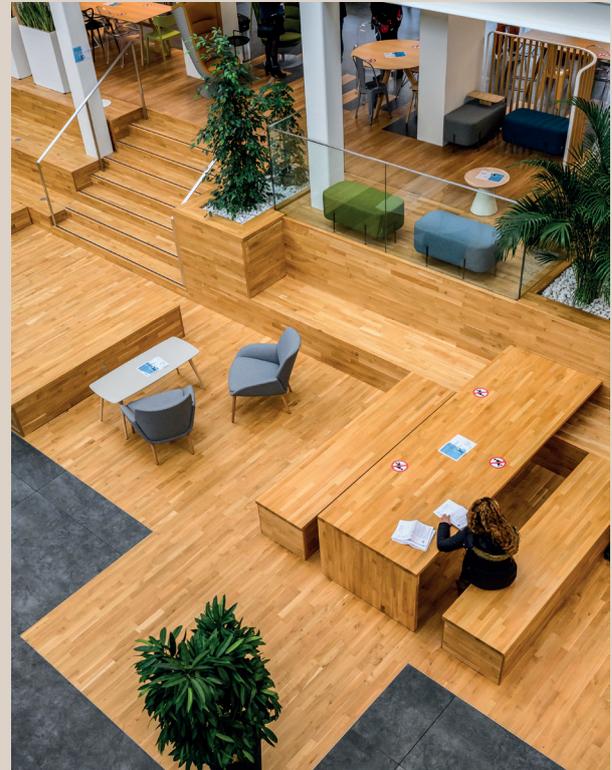
$$C_{\text{stat}} = \frac{Q_{\text{ext}} \cdot C_{\text{ext}} + \phi}{Q_T}$$

et  $C_0$  (part.m<sup>-3</sup>) : la concentration initiale en aérosol dans la pièce.

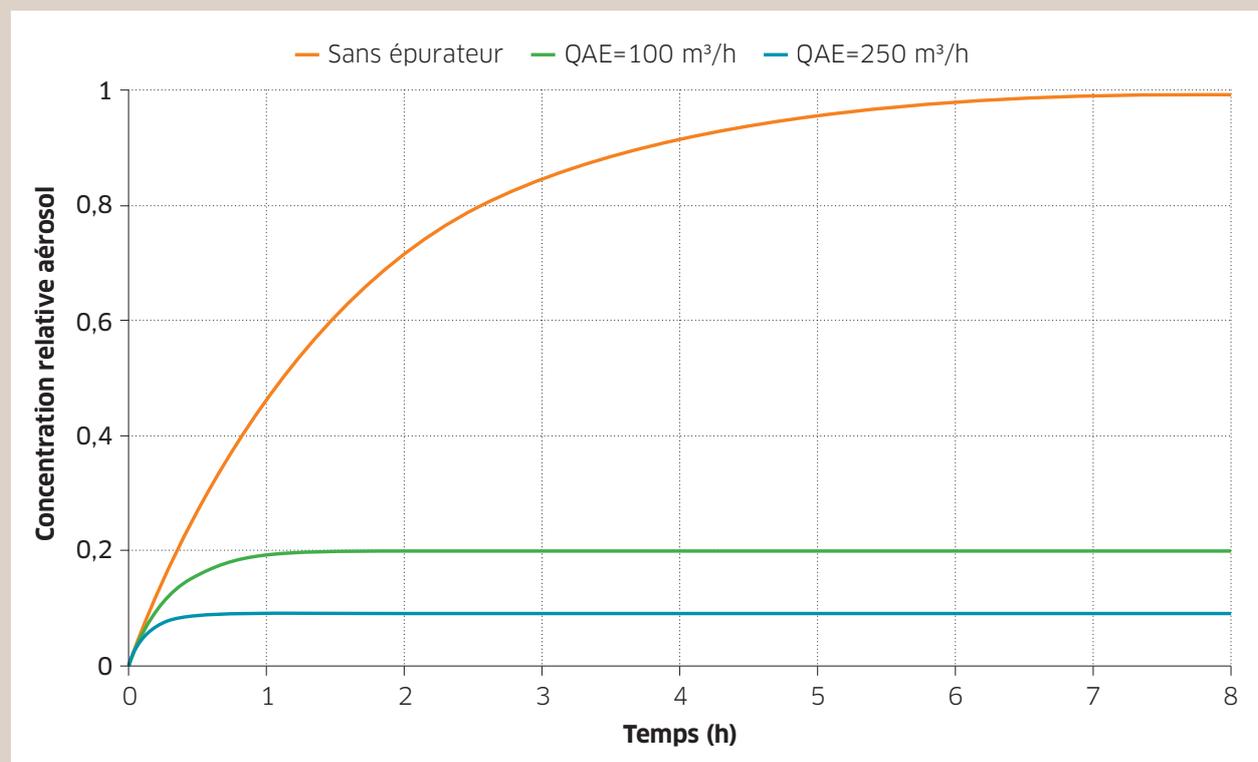
Ainsi, par exemple, pour un volume d'une pièce :  $V = 40 \text{ m}^3$  ( $4\text{m} \times 4\text{m} \times 2,5\text{m}$ ) et un débit de ventilation mécanique  $Q_{\text{ext}} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et en considérant qu'il n'y a pas d'apport d'aérosol de l'extérieur ( $C_{\text{ext}} = 0 \text{ part.m}^{-3}$ ), l'évolution de la concentration normée d'aérosol dans la pièce en fonction du temps, avec  $C_0 = 0 \text{ part.m}^{-3}$  et pour différents débits d'air épuré ( $Q_{\text{AE}}$ ), est représentée sur la *Figure F2*.

Un épurateur dont le débit nominal de fonctionnement  $Q_{\text{ep}} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et équipé d'un filtre HEPA installé de manière étanche, possédant par conséquent une efficacité de filtration  $E \approx 1$ , délivrera un débit d'air épuré  $Q_{\text{AE}} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . D'après la *Figure F2*, la mise en place d'un tel épurateur devrait conduire à réduire jusqu'à un facteur 5 la concentration d'un aérosol dans la pièce

par rapport à une configuration sans épurateur. Lorsque le débit d'air épuré est porté à  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , la concentration de l'aérosol peut être réduite d'un facteur 10. ●



© Gaël Kerbaol/INRS/2021



↑ FIGURE F2 Représentation de l'évolution de la concentration relative d'un aérosol dans la pièce au cours du temps, avec et sans épurateur.