

N° 4761
ASSEMBLÉE NATIONALE
CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958
QUINZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la présidence de l'Assemblée nationale
le 2 décembre 2021

N° 257
SÉNAT

SESSION ORDINAIRE 2021 - 2022

Enregistré à la présidence du Sénat
le 2 décembre 2021

au nom de

**L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

sur

Qualité de l'air et Covid-19 : quelles interactions ?

PAR

M. Jean-Luc FUGIT, député, et Mme Angèle PRÉVILLE, sénatrice

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. Cédric VILLANI,
Président de l'Office

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Gérard LONGUET
Premier vice-président de l'Office

Composition de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Président

M. Cédric VILLANI, député

Premier vice-président

M. Gérard LONGUET, sénateur

Vice-présidents

M. Didier BAICHÈRE, député
M. Jean-Luc FUGIT, député
M. Patrick HETZEL, député

Mme Sonia de LA PROVÔTÉ, sénatrice
Mme Angèle PRÉVILLE, sénatrice
Mme Catherine PROCACCIA, sénateur

DÉPUTÉS

M. Julien AUBERT
M. Philippe BOLO
Mme Émilie CARIOU
M. Claude de GANAY
M. Jean-François ELIAOU
Mme Valéria FAURE-MUNTIAN
M. Thomas GASSILLOUD
Mme Anne GENETET
M. Pierre HENRIET
M. Antoine HERTH
M. Jean-Paul LECOQ
M. Gérard LESEUL
M. Loïc PRUD'HOMME
Mme Huguette TIEGNA

SÉNATEURS

Mme Laure DARCOS
Mme Annie DELMONT-KOROPOULIS
M. André GUIOL
M. Ludovic HAYE
M. Olivier HENNO
Mme Annick JACQUEMET
M. Bernard JOMIER
Mme Florence LASSARADE
M. Ronan Le GLEUT
M. Pierre MÉDEVIELLE
Mme Michelle MEUNIER
M. Pierre OUZOULIAS
M. Stéphane PIEDNOIR
M. Bruno SIDO

SOMMAIRE

Pages

SAISINE	7
SYNTHÈSE	8
INTRODUCTION	13
I. POLLUTION DE L’AIR EXTÉRIEUR ET RECRUESCENCE DE CAS DE COVID-19.....	17
A. POLLUTION DE L’AIR ET RISQUES SANITAIRES	17
1. Les polluants réglementés.....	17
2. Lien général entre pollution de l’air et santé publique	18
B. L’EXPOSITION À LA POLLUTION : FACTEUR DE RISQUE FACE AU SARS-COV-2 ?	20
1. Pics de pollution et hausse du nombre de cas de Covid-19.....	21
2. L’exposition chronique à la pollution : facteur de comorbidité ?.....	23
3. Les mécanismes biologiques à l’œuvre	24
C. TRANSPORT DU VIRUS PAR LES PARTICULES FINES.....	25
1. Les particules fines comme possible support de diffusion du virus	25
2. Transmission du SARS-Cov-2 par aérosols et possible interaction avec les particules fines	26
3. Les conditions climatiques propices à la survie du virus sont aussi celles propices aux pics de pollution.....	27
II. TRANSMISSION DU SARS-COV-2 EN MILIEU CONFINÉ ET QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR.....	29
A. LA QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR ET SES EFFETS SANITAIRES.....	29
B. DES MODES DE TRANSMISSION DIFFÉRENTS EN MILIEU CONFINÉ ?	30
1. L’importance de la transmission par aérosols en milieu confiné.....	30
2. Les évènements de « super-propagation »	31
C. L’IMPORTANCE DE LA VENTILATION ET DE L’AÉRATION DES PIÈCES	31
D. LA MESURE DE CO₂ : UN BON INDICATEUR DE LA VENTILATION D’UNE PIÈCE.....	32
1. Principe et intérêt de la mesure du niveau de CO ₂ dans une pièce	32

2. Lignes de conduite pour l'usage des capteurs de CO ₂	32
E. LES PURIFICATEURS D'AIR ET LEUR RÔLE DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉPIDÉMIE	34
1. Classification des dispositifs mobiles de purification de l'air	34
a. Purification de l'air par piégeage.....	35
i. Filtration	35
ii. Ionisation et filtration électrostatique	35
b. Purification de l'air par oxydation ou destruction	35
i. Utilisation d'un plasma.....	35
ii. Ozonation.....	35
2. Les recommandations du HSCP	36
F. PRÉCONISATIONS NATIONALES ET PREMIÈRES EXPÉRIENCES.....	36
RECOMMANDATIONS	39
EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE	41
LISTE DES PERSONNES ENTENDUES PAR LES RAPPORTEURS.....	53
ANNEXE : COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE SUR « TRANSMISSION DU VIRUS DANS LES ESPACES CONFINÉS, RÔLE DES CAPTEURS DE CO₂ ET DES PURIFICATEURS D'AIR » (4 novembre 2021).....	55
TRANSMISSION DU CORONAVIRUS DANS LES MILIEUX CONFINÉS, LES CAPTEURS DE CO₂ ET LES PURIFICATEURS D'AIR : QUESTIONS DES INTERNAUTES.....	91

SAISINE



ASSEMBLÉE
NATIONALE

COMMISSION DES AFFAIRES SOCIALES
La présidente

COMMISSION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
La présidente

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LIBERTÉ - ÉGALITÉ - FRATERNITÉ

Paris, le 16 septembre 2021

Monsieur le Président,

En mai 2020, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a examiné une note présentée par M. Jean-Luc Fugit, député, sur le thème des interactions entre pollution de l'air, gaz à effet de serre et crise de la Covid-19.

Cette note portait d'une part, sur l'évolution de la pollution de l'air lors du confinement du printemps 2020 et, d'autre part, sur la pollution de l'air comme possible facteur aggravant de l'épidémie. Il nous semble qu'une mise à jour et un approfondissement de ces travaux éclaireraient utilement les parlementaires sur des enjeux dont nous savons toute l'importance, sur un plan tant sanitaire qu'environnemental.

C'est pourquoi nous vous informons que la commission des affaires sociales et la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale souhaitent conjointement saisir l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques d'une étude qui permettrait de dresser un bilan des connaissances scientifiques sur ce sujet et d'avancer des recommandations dont nous pourrions collectivement nous saisir. Cette saisine est réalisée en application de l'article 6 *ter* de l'ordonnance n° 58-1100 du 17 novembre 1958 relative au fonctionnement des assemblées parlementaires.

Nous vous prions de croire, Monsieur le Président, à l'assurance de nos sentiments les meilleurs.

Fadila KHATTABI

Laurence MAILLART-MÉHAIGNERIE

Monsieur Cédric VILLANI
Président de l'Office parlementaire d'évaluation
des choix scientifiques et technologiques

SYNTHÈSE

En mai 2020, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) a publié une note intitulée « Pollution de l'air, gaz à effet serre et crise du Covid-19 : quelles interactions ? » qui s'intéressait d'une part, à l'évolution de la pollution de l'air (gaz à effet de serre et polluants réglementés) lors du confinement du printemps 2020, d'autre part à la pollution de l'air comme possible facteur aggravant de l'épidémie. Lors de l'examen de la note, l'Office avait jugé qu'une mise à jour serait nécessaire afin de suivre l'évolution des travaux, nationaux et internationaux, sur ce sujet important.

Plus d'un an et demi après le début de la pandémie de Covid-19, les études scientifiques ont été poursuivies et ont fourni de nouvelles données. C'est pourquoi le 16 septembre 2021, la commission des affaires sociales et la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale ont conjointement saisi l'Office afin de « dresser un bilan des connaissances scientifiques sur ce sujet » et « d'avancer des recommandations dont nous pourrions collectivement nous saisir ».

Comment peut-on expliquer l'augmentation des contaminations lors des épisodes de forte pollution ? Une pollution chronique favorise-t-elle la maladie ? Les particules très fines ont-elles un rôle spécifique dans le transport aérien du virus ? Dans les espaces clos, peut-on se contenter d'aérer régulièrement ou doit-on aussi mobiliser des dispositifs comme les purificateurs d'air ? Étayé par les enseignements tirés d'une audition publique organisée le 4 novembre, le rapport de l'Office fait le point sur des questions qui touchent au quotidien de chacun.

Pollution de l'air extérieur et recrudescence de cas de Covid-19

La pollution de l'air, notamment à travers les particules fines (PM), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone, est suivie quotidiennement sur une grande partie du territoire français en raison des risques associés pour les fonctions respiratoire et immunitaire, et plus globalement la santé humaine. L'exposition à des polluants peut être ponctuelle (pic de pollution) ou chronique. Selon Santé publique France, la pollution de l'air aux PM_{2,5} (particules de taille inférieure à 2,5 µm) serait responsable, en France, d'environ 40 000 décès prématurés

par an, soit 6 % de la mortalité totale. En Europe, plus de 300 000 personnes seraient mortes prématurément en 2019 à cause de la pollution aux particules fines.

Dès le début de la pandémie de Covid-19, la pollution de l'air a été suspectée d'être un facteur aggravant. Des chercheurs ont enquêté sur un possible lien entre les épisodes de forte pollution et l'augmentation du nombre de cas graves, voire de morts. En complément de ces études statistiques, des travaux se sont intéressés aux mécanismes biologiques qui pourraient être à l'œuvre.

Des enquêtes ont été menées d'abord en Chine puis en Europe, la majorité calculant des corrélations spatiales entre les concentrations atmosphériques des principaux polluants réglementés et le taux de contamination par le virus. Leurs résultats vont dans le même sens : les zones où le virus circule le plus correspondent aux zones avec les plus forts taux de pollution, notamment en PM_{2,5} et en NO₂. Les rapporteurs appellent cependant à la prudence vis-à-vis de ces résultats, qui sont issus de modélisations et de calculs de corrélation et dont l'interprétation doit être pondérée par la considération de certains facteurs sources de biais : densité de population, maladies chroniques, tabagisme, composition des familles par exemple.

C'est pourquoi les rapporteurs recommandent de mettre en place des études sur cohorte pour mieux explorer ces phénomènes dans leur pleine mesure.

Les zones décrites dans ces études, souvent industrielles, sont sujettes à des pics temporaires de pollution, mais aussi à une pollution chronique. Des études montrent une corrélation statistique entre les répartitions spatiales de la pollution chronique et des formes graves, voire mortelles, de Covid-19. D'autres études suggèrent que l'exposition chronique à des polluants tels que les PM_{2,5} ou le dioxyde d'azote favoriserait la surexpression de l'enzyme ACE2 située sur la face externe des membranes plasmiques des cellules de l'appareil respiratoire. Or l'ACE2 est le récepteur sur lequel se fixe la protéine Spike du SARS-CoV-2. Une exposition chronique à ces polluants

faciliterait ainsi l'entrée du virus dans les cellules et augmenterait le risque de développer des formes graves de Covid-19. Par ailleurs, la réponse immunitaire peut être perturbée par les polluants, notamment les particules fines issues d'activité de combustion.

Une autre hypothèse avance que les polluants peuvent jouer un rôle dans le transport aéroporté du virus, ce qui expliquerait la forte circulation du virus les jours pollués. La probabilité d'interaction entre une particule fine et un aérosol porteur de charge virale est cependant très faible, en particulier à cause de l'effet de dilution en air extérieur. La recrudescence du nombre de cas de Covid-19 les jours de pics de pollution pourrait plutôt résulter de ce que les conditions météorologiques (température, humidité) propices aux pics de pollution sont aussi les plus propices à la survie du virus en extérieur.

Transmission du SARS-CoV-2 en milieu confiné et qualité de l'air intérieur

En milieu confiné, les dynamiques de circulation du virus sont différentes et l'effet de dilution devient négligeable. Les polluants de l'air intérieur proviennent de différentes sources, la plupart liées aux activités humaines (ménage, tabagisme) ou à la combustion. Les conséquences sur la santé humaine sont similaires à celles des polluants de l'air extérieur. Ces effets sont souvent sous-estimés alors que nous passons en moyenne 80 % de notre temps en milieu intérieur. Des agents pathogènes (virus, bactéries, champignons) peuvent aussi proliférer dans les espaces confinés, souvent chauds et humides car peu aérés ; l'effet de dilution étant plus

faible en milieu clos, le transport de ces agents – y compris le virus SARS-CoV-2 – par les polluants de l'air intérieur peut être favorisé.

Les agents pathogènes sont souvent de même taille que les polluants, les méthodes de gestion des polluants de l'air intérieur peuvent donc aussi s'appliquer. Pour la Covid-19, il s'agit alors de savoir si la charge virale peut se trouver durablement en suspension dans l'air, ce qui rejoint la question de la potentielle contamination par aérosols.

Les virus, en particulier le SARS-CoV-2, peuvent se transmettre de différentes manières. Les principales sont le contact direct avec la bouche, le nez, ou les muqueuses des yeux, et les modes de transmission dits aéroportés. Ce dernier cas peut faire intervenir les gouttelettes, de taille supérieure à 5 µm – lourdes, elles tombent rapidement au sol – ou les aérosols, de taille inférieure à 5 µm et plus légers, qui peuvent se déplacer sur une plus grande distance et rester longtemps en suspension.

En milieu clos, il est important de quantifier la part de contamination par aérosols car les dynamiques de propagation sont particulières. La transmission par aérosols peut être réduite par des mesures de renouvellement de l'air intérieur, comme peut l'être la concentration des polluants de l'air intérieur. C'est pourquoi l'aération régulière des pièces est un geste barrière qui permet d'éviter l'accumulation de particules fines et d'aérosols susceptibles de transporter le virus. Même si le Haut conseil de la santé publique recommande une aération de 5 minutes toutes les heures dans les

établissements recevant du public (ERP), la durée et la fréquence dépendent du volume de la pièce, du nombre de personnes présentes, des activités effectuées ou encore de la ventilation déjà en place.

Un bon indicateur du renouvellement de l'air dans une pièce est le niveau de dioxyde de carbone (CO₂). Facilement mesurable à l'aide de petits capteurs, le dioxyde de carbone est émis lors de la respiration et s'accumule dans la pièce au fil du temps. La concentration atmosphérique en CO₂ est, en moyenne, de 400 ppm ; plus un espace est clos, mal ventilé, et contient un grand nombre de personnes, plus la concentration en dioxyde de carbone est importante et croissante.

Le collectif Projet CO₂ présente une grille de lecture des situations possibles :

- **< 800 ppm** : correspond à une qualité d'air excellente et constitue donc une valeur « cible » à atteindre ;
- **entre 800 et 1 000 ppm** : correspond à une qualité d'air moyenne ;
- **entre 1 000 et 1 500 ppm** : correspond à une qualité d'air modérée et à des valeurs trop élevées en contexte Covid-19 ;
- **> 1 500 ppm** : correspond à une qualité d'air basse et à des valeurs beaucoup trop élevées en contexte Covid-19.

Les rapporteurs recommandent l'installation et l'usage des capteurs de CO₂ dans les ERP afin de faciliter la

mise en place des mesures d'aération et de diminuer le risque de contamination par aérosols dans la lutte contre le SARS-CoV-2. Un tel usage dépasse d'ailleurs la lutte contre la Covid-19 et s'étend à la prévention des épidémies saisonnières et respiratoires, comme la grippe et la bronchiolite, et à l'objectif général de santé publique qu'est une bonne qualité de l'air intérieur.

On voit par ailleurs se développer un marché des purificateurs d'air, censés aspirer et « nettoyer » l'air intérieur au moyen de filtres mécaniques ou de procédés physiques ou chimiques, sans qu'il soit besoin d'ouvrir les fenêtres. Ils seraient surtout indiqués en cas de pic de pollution en extérieur, puisqu'ouvrir les fenêtres pour aérer pourrait alors être contre-productif.

Les techniques (filtration, piégeage, oxydation, etc.) sont antérieures à la pandémie de Covid-19 et visent à éliminer les polluants de l'air intérieur. L'efficacité de certains dispositifs rend possible leur utilisation pour assainir l'air ambiant des agents pathogènes, et donc potentiellement du virus SARS-CoV-2. Au vu des avis rendus par les agences sanitaires, les rapporteurs estiment que les purificateurs d'air équipés de filtres HEPA 13 ou 14 sont

la solution de référence et qu'il convient de rester prudent quant à l'utilisation des autres techniques, notamment dans les ERP. En effet, les filtres mécaniques HEPA n'initient aucune réaction physico-chimique susceptible de produire des polluants.

Les rapporteurs soulignent que l'amélioration de la qualité de l'air intérieur doit reposer en priorité sur un renouvellement de l'air résultant de la ventilation et de l'aération, dès lors que la qualité de l'air extérieur le permet, et que l'usage de purificateurs d'air doit être vu comme une mesure complémentaire.

C'est sur la toile de fond formée par tous ces éléments que s'est déroulée l'audition publique du 4 novembre 2021 sur le thème « Transmission du virus dans les espaces confinés, rôle des capteurs de CO₂ et des purificateurs d'air ». Cette audition publique a permis d'approfondir nombre de sujets et les **dix recommandations formulées par les rapporteurs** visent à proposer une stratégie globale non seulement pour la prise en compte des interactions entre la pollution de l'air et l'épidémie de Covid-19 mais aussi, plus globalement, au service de la qualité de l'air dans les milieux confinés.

INTRODUCTION

En mai 2020, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) a publié une note intitulée « Pollution de l'air, gaz à effet serre et crise du Covid-19 : quelles interactions ? »¹ qui s'intéressait d'une part, à l'évolution de la pollution de l'air (gaz à effet de serre et polluants réglementés) lors du confinement du printemps 2020, et d'autre part à la pollution de l'air comme possible facteur aggravant de l'épidémie.

Si différents moyens de mesure avaient permis d'explorer précisément le premier axe et d'en quantifier certains éléments, les études relevant du deuxième axe en étaient encore à leurs débuts car le retour d'expérience faisait défaut et l'on manquait de données de long terme. Une des principales conclusions avançait que « *Si la pollution de l'air ne semble pas jouer massivement sur la transmission du virus, elle peut être considérée comme un cofacteur du risque de mortalité par Covid-19 des personnes infectées* ».

Lors de l'examen de la note, l'Office avait jugé qu'une mise à jour serait nécessaire afin de suivre l'évolution des travaux, nationaux et internationaux, sur ce sujet important. Plus d'un an et demi après le début de la pandémie de Covid-19, les études scientifiques ont été poursuivies et ont fourni de nouvelles données.

C'est pourquoi le 16 septembre 2021, la commission des affaires sociales et la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale ont conjointement saisi l'Office afin de « *dresser un bilan des connaissances scientifiques sur ce sujet* » et « *d'avancer des recommandations dont nous pourrions collectivement nous saisir* ».

L'OPECST a confié cette étude à M. Jean-Luc Fugit, député, et Mme Angèle Prévile, sénatrice, le 29 septembre 2021.

Les rapporteurs ont suivi une démarche d'investigation conforme aux pratiques habituelles de l'Office, en s'appuyant sur les derniers articles de recherche scientifique et en organisant une consultation des différentes parties prenantes : chercheurs, industriels, associations, etc.

Les rapporteurs ont aussi cherché à couvrir pleinement l'étendue de la saisine. C'est pourquoi, après avoir noté que la population générale passe en moyenne 80 % de son temps en milieu clos, ils ont orienté une partie de leur travail vers l'étude de la pollution de l'air intérieur, qui a des conséquences cruciales dans le cadre de la lutte contre l'épidémie de Covid-19. Afin de mettre en valeur les enjeux liés à ce sujet, les rapporteurs ont organisé une audition

¹ https://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/308996/2993745/version/1/file/OPECST-Note_pollution+VF.pdf

publique sur le thème « Transmission du coronavirus dans les milieux confinés, capteurs de CO₂ et purificateurs d'air » le 4 novembre 2021.

Des délais trop courts et le maintien nécessaire d'une vigilance sanitaire n'ont pas permis aux rapporteurs d'effectuer de déplacements sur le terrain mais ils souhaitent continuer à faire vivre ce sujet important pour la santé publique et à diffuser les recommandations qui concluent cette étude.

*

* *

La pollution de l'air est un phénomène qui impacte fortement notre organisme et entraîne ou aggrave notamment des pathologies respiratoires comme l'asthme, la toux, la bronchiolite ou le cancer des poumons. La pollution aux particules fines est responsable d'environ 40 000 morts prématurées chaque année en France et on estime qu'en Europe, plus de 300 000 décès ont été imputables à cette pollution en 2019. Dès le début de la pandémie de Covid-19, des suspicions de lien entre exposition à la pollution et formes graves de Covid-19 ont émergé, car les symptômes sont principalement d'ordre respiratoire ou immunitaire. Rapidement, les travaux ont exploré principalement deux axes complémentaires :

1. L'exposition à une pollution chronique ou à des pics de pollution comme facteur de risque pour développer des formes graves – voire létales – de Covid-19 ;
2. Le rôle des polluants – notamment des particules fines – dans le transport et la transmission du virus en extérieur.

À ce stade de la pandémie, le premier axe est celui qui a vu le plus de résultats, même si l'on manque encore de recul et que la fiabilité de données reste perfectible. Au-delà de corrélations statistiques peu probantes en soi, des explications biologiques et physiologiques consolident l'hypothèse. Les pics de pollution étant plus fréquents en hiver, les rapporteurs ont alors souhaité mettre en lumière les conséquences possibles au regard d'une saisonnalité de l'épidémie.

Le deuxième axe doit être examiné à l'aune des questionnements sur la survie du virus dans certaines conditions environnementales, notamment de température et d'humidité relative. Cependant, l'hypothèse d'un rôle joué par les polluants dans la diffusion du virus ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique car plusieurs autres phénomènes peuvent expliquer la hausse du nombre de cas de Covid-19 lors des pics de pollution.

Par ailleurs, l'hypothèse d'une transmission du virus par aérosols est très vite apparue, dont le rôle semble être central, notamment en milieu confiné. Les aérosols, de petite taille, peuvent rester en suspension pendant plusieurs jours et se déplacer sur de longues distances. Ils sont soupçonnés d'être responsables des évènements de super-contamination. Leur petite taille a suggéré qu'ils pourraient interagir avec les particules fines de pollution mais les méthodes de traitement de

l'air développées pour améliorer la qualité de l'air intérieur peuvent en avoir raison. C'est pourquoi les rapporteurs se sont penchés sur le sujet et ont formulé des recommandations pour les établissements recevant du public (ERP), lieux sensibles pour le risque de contamination. L'audition publique du 4 novembre a permis de faire le point sur l'utilité des capteurs de dioxyde de carbone (CO₂) et sur celle des purificateurs d'air dans ces établissements ; elle a souligné l'intérêt d'établir des guides de bonnes pratiques pour aider les collectivités dans leur gestion de l'épidémie de Covid-19.

I. POLLUTION DE L'AIR EXTÉRIEUR ET RECRUESCENCE DE CAS DE COVID-19

A. POLLUTION DE L'AIR ET RISQUES SANITAIRES

1. Les polluants réglementés

L'environnement contient de nombreux polluants provenant de sources variées. Dans le cas particulier de l'air, ces polluants sont dits « atmosphériques ». En France, la surveillance de la qualité de l'air est obligatoire pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants. Elle est gérée par le réseau des AASQA¹ (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) et se concentre sur les polluants dits « réglementés », qui présentent des effets avérés sur la santé et l'environnement et qui obéissent à des normes relevant du code de l'environnement et des directives européennes 2004/107/CE et 2008/50/CE².

Parmi les polluants réglementés, certains sont d'un intérêt particulier :

- Les **oxydes d'azote**, communément appelés NO_x (NO et NO₂). Ils sont principalement issus des activités de combustion (moteurs thermiques, notamment diesel, chauffage non performant, etc.) et de la chimie de l'azote (notamment la synthèse d'engrais chimiques). Ils constituent ainsi un bon marqueur de l'activité anthropique et du trafic routier. Certaines sources naturelles, comme les volcans ou les orages, peuvent aussi générer des NO_x. Ceux-ci possèdent une forte action irritante des voies respiratoires, surtout sous la forme NO₂, et peuvent être précurseurs d'autres polluants³ tels que l'ozone troposphérique (O₃) ou l'ammoniac (NH₃).
- Les **particules fines** (ou PM pour *particulate matter* en anglais), dont les **PM₁₀** et les **PM_{2,5}** désignent celles de taille inférieure, respectivement, à 10 µm et 2,5 µm⁴. Leurs sources sont multiples et peuvent être anthropiques (activités industrielles, transports, chauffage, etc.) ou naturelles (poussières du désert, pollens, érosion des sols, etc.). **Plus elles sont fines, plus elles peuvent pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire** (Figure 1). On soupçonne les PM_{2,5} d'atteindre les alvéoles pulmonaires et peut-être même de passer dans la circulation sanguine. Des études récentes s'intéressent aussi aux particules dites ultra fines (les PUF), de taille

¹ Les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, chargées de mesurer et d'étudier la pollution de l'air dans les différentes régions françaises. Elles sont regroupées au sein de la fédération ATMO France. Grâce à des stations de mesure fixes ou mobiles, elles mesurent au quotidien la qualité de l'air et les principaux polluants réglementés.

² <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/les-polluants-atmospheriques-surveilles-et-a11763.html>

³ Les jours de fort ensoleillement, à fort rayonnement UV, ils sont à l'origine de réactions photochimiques avec, par exemple, des COV (composés organiques volatiles).

⁴ A titre d'exemple, les PM10 sont 6 à 8 fois plus petites qu'un cheveu.

inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ (ce qui correspond à la taille d'un virus) et qui ne sont aujourd'hui pas réglementées. Provenant de sources diverses, elles sont extrêmement nocives car leur toute petite taille leur permet de passer dans la circulation sanguine et elles pourraient avoir des conséquences non seulement respiratoires, cardiovasculaires mais aussi neurologiques¹.

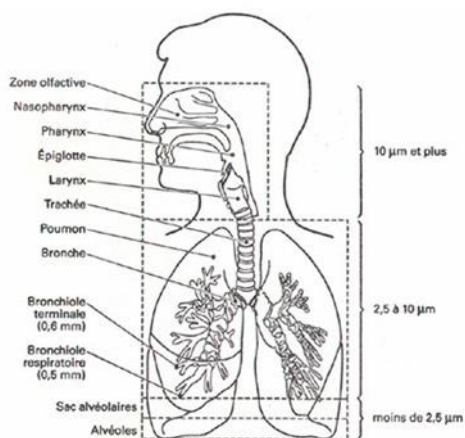


Figure 1 : Pénétration des particules dans l'organisme (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du Dr J. Harkema). Source : Santé Publique France

- L'**ozone**, pour lequel on distingue l'ozone troposphérique, dit « mauvais ozone », de l'ozone stratosphérique, dit « bon ozone ». Le premier est présent dans les basses couches de l'atmosphère, et constitue un polluant très irritant pour les voies respiratoires. Créé par des réactions photochimiques favorisées par un fort ensoleillement, il affecte fortement les voies respiratoires et irrite les yeux. *A contrario*, l'ozone des hautes couches atmosphériques agit comme une barrière protectrice contre les rayons ultraviolets (UV) solaires les plus agressifs.

À ces trois polluants majeurs s'ajoutent le **dioxyde de soufre** (qui provient des activités liées aux énergies fossiles mais aussi des volcans), les **métaux lourds** (plomb, nickel, etc.), les **hydrocarbures aromatiques polycycliques** ou HAP (comme le benzène) et les **composés organiques volatils** ou COV, vaste famille de substances ayant un point d'ébullition très bas et qui peuvent donc se trouver facilement sous forme de gaz dans l'atmosphère ; les COV sont souvent des précurseurs d'ozone, de particules secondaires ou de gaz à effet de serre.

2. Lien général entre pollution de l'air et santé publique

Les concentrations atmosphériques de ces polluants sont suivies quotidiennement et sur une grande partie du territoire, car ils présentent des risques pour la santé humaine, notamment vis-à-vis de l'appareil respiratoire et du système immunitaire.

¹ Avec des risques associés sur la santé périnatale ou les capacités cognitives des enfants.

Selon Santé Publique France, la pollution de l'air aux PM_{2,5} serait responsable, en France, d'environ 40 000 morts prématurées par an¹, soit 6 % de la mortalité totale. En Europe, plus de 300 000 personnes sont mortes prématurément en 2019 à cause de la pollution, principalement celle due aux particules fines².

L'exposition à des polluants peut être ponctuelle (pic de pollution temporaire) ou chronique. Selon une étude épidémiologique portant sur 17 villes françaises publiée en 2015 par Santé Publique France, les effets sanitaires sont avérés dans les deux cas³.

Une exposition ponctuelle à des polluants peut provoquer des symptômes irritatifs au niveau des yeux, du nez et de la gorge à très court terme, le jour même ou dans les jours qui suivent. Des pathologies respiratoires chroniques, telles que l'asthme, peuvent aussi être aggravées.

Sur un plan quantitatif, l'étude a montré qu'« *une augmentation de 10 µg/m³ des niveaux de PM₁₀ du jour et des cinq jours précédents se traduit par une augmentation de 0,5 % de la mortalité non accidentelle. L'excès de risque est plus élevé chez les personnes de 75 ans et plus (+1,04 %) et les effets sur la mortalité sont plus importants en été.* »

À titre de comparaison, selon AirParif, le niveau de fond moyen en PM₁₀ en agglomération parisienne oscille entre 15 et 20 µg/m³ et les concentrations moyennes annuelles en zone rurale sont comprises entre 13 et 15 µg/m³. Les dernières normes de l'Organisation mondiale de la santé préconisent de rester en dessous d'une moyenne annuelle à 15 µg/m³ pour les PM₁₀ et 45 µg/m³ sur 24h.

En plus des conséquences respiratoires, principalement dues à l'ozone et au dioxyde d'azote, les pics de pollution entraînent aussi une hausse des accidents cardio-vasculaires, avec un lien établi avec les concentrations en particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}).

Une exposition chronique, même à des faibles concentrations, peut, *in fine*, présenter des conséquences plus importantes : baisse de l'espérance de vie, hausse de la mortalité, développement de pathologies cardio-vasculaires, du cancer du poumon et de maladies respiratoires (Figure 2). Il faut noter que ce phénomène apparaît non seulement en zone urbaine mais aussi en zone rurale : « *Dans les zones urbaines de plus de 100 000 habitants, en moyenne, 15 [5-25] mois d'espérance de vie à 30 ans sont perdus en relation avec les PM_{2,5}.* Le

¹ <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2021/pollution-de-l-air-ambient-nouvelles-estimations-de-son-impact-sur-la-sante-des-francais>

² <https://www.eea.europa.eu/highlights/cleaner-air-could-have-saved>

³ Corso M, Pascal M, Wagner V, Blanchard M, Bateau A, Cochet A, et al. Impact à court terme des particules en suspension (PM₁₀) sur la mortalité dans 17 villes françaises, 2007- 2010. Bull Epidémiol Hebd. 2015 ;(1-2):14-20. http://www.invs.sante.fr/beh/2015/1-2/2015_1-2_3.html

poids des PM_{2,5} est également important dans les zones rurales [avec] 9 [3-14] mois de perte d'espérance vie en moyenne »¹

L'inflammation et le stress oxydatif induits sur de longues périodes finissent par affaiblir le système immunitaire et à perturber les mécanismes de défense.

L'étude Gazel'Air, dirigée par l'INSERM, a suivi pendant plus de 25 ans (1989-2015) une cohorte de 20 000 personnes soumises à une pollution atmosphérique, notamment de particules fines, de dioxyde d'azote (NO₂) et de benzène. Les résultats montrent qu'« une augmentation de 10 µg/m³ des PM_{2,5} était associée à une augmentation de 15 % du risque de mortalité totale non-accidentelle ».

Ainsi, que l'exposition soit chronique ou temporaire, la pollution de l'air engendre un ensemble de symptômes respiratoires et cardio-vasculaires mais aussi une inflammation chronique qui amène une baisse de la réponse immunitaire.

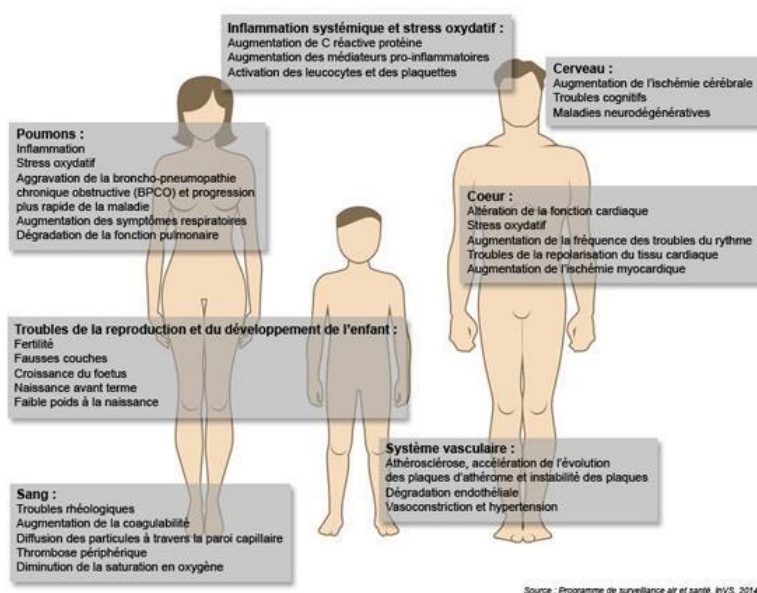


Figure 2 : les symptômes d'une exposition chronique à la pollution de l'air

B. L'EXPOSITION À LA POLLUTION : FACTEUR DE RISQUE FACE AU SARS-COV-2 ?

Dès le début de la pandémie, la pollution de l'air a été suspectée d'être un facteur aggravant de la Covid-19 car celle-ci est une pathologie d'origine respiratoire. Des chercheurs ont enquêté sur un possible lien entre les épisodes de

¹ Pascal M, de Crouy Chanel P, Wagner V, Corso M, Tillier C, Bentayeb M, et al. Analyse des gains en santé de plusieurs scénarios d'amélioration de la qualité de l'air en France continentale. Bull Epidemiol Hebd. 2016;(26-27):430-7. http://invs.santepubliquefrance.fr/beh/2016/26-27/2016_26-27_1.html

forte pollution et l'augmentation du nombre de cas graves, voire de morts. En complément de ces études statistiques, des travaux s'intéressent aussi aux mécanismes biologiques qui pourraient être à l'œuvre.

En parallèle, d'autres études scientifiques font état d'une hausse du nombre de cas de Covid-19 après des épisodes de pic de pollution de l'air, sans qu'il s'agisse forcément de cas graves ou mortels. Les polluants, notamment les particules fines, sont alors suspectés de jouer un rôle dans le transport et la transmission du virus.

Les deux questions, en apparence proches, concernent en réalité des phénomènes physiques et biologiques différents, c'est pourquoi ils seront abordés séparément.

1. Pics de pollution et hausse du nombre de cas de Covid-19

Dès le début de la pandémie, en Chine puis en Italie, des chercheurs ont cherché à établir un lien entre les concentrations atmosphériques en polluants, surtout les particules fines et le NO₂, et l'occurrence des cas de contamination à la Covid-19.

Une revue très complète des études menées sur le sujet a été réalisée au premier semestre 2020¹, une attention particulière étant portée sur une vingtaine d'études internationales et les résultats d'expérimentations *in vitro*, menées sur des animaux ou des humains, étant également pris en compte.

En Chine, une étude similaire avait déjà été menée en 2003 lors de l'épidémie de SRAS (Syndrome respiratoire aigu sévère lié au virus SARS-CoV)². Elle avait montré que les patients vivant dans une zone modérément polluée³ voyaient leur risque de décès majoré de 84 % par rapport aux patients vivant dans une zone faiblement polluée. De plus, la létalité était deux fois plus importante dans une zone fortement polluée par rapport à une zone faiblement polluée.

Dans le cas du SARS-CoV-2, les études ont, de même, commencé en Chine avec, dès juillet 2020, l'étude Zhu *et al*⁴ qui analysait la relation entre concentration en polluants et cas de Covid-19 dans 120 villes de Chine entre le 23 janvier et le 29 février 2020. Cette étude a mis en évidence des corrélations positives entre les concentrations en PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, et O₃ et l'occurrence de

¹ Bourdrel T, Annesi-Maesano I, Alahmad B, et al. The impact of outdoor air pollution on Covid-19: a review of evidence from *in vitro*, animal, and human studies. *Eur Respir Rev* 2021; 30: 200242 <https://doi.org/10.1183/16000617.0242-2020>

² Cui, Y., Zhang, ZF., Froines, J. et al. Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study. *Environ Health* 2, 15 (2003). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-2-15>

³ Les polluants mesurés étaient les particules fines, le dioxyde soufre, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone et l'ozone.

⁴ Y. Zhu et al. / *Science of the Total Environment* 727 (2020) 138704 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>

nouveaux cas. Ainsi, quand les taux en PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂, et O₃ augmentaient de 10 µg/m³, l'occurrence de cas de Covid-19 augmentait respectivement de 2,24 %, 1,76 %, 6,94 % et 4,76 %.

En Europe, des travaux ont vu le jour au fil de la propagation de l'épidémie. Tout d'abord en Italie, l'équipe de Dragone *et al*¹ a suivi les pics de pollution en Lombardie (un des premiers foyers de l'épidémie) entre février et mars 2020. Elle met en évidence une association entre des épisodes de pollution élevée et une hausse des nouveaux cas. Les chercheurs remarquent aussi un retard de trois jours en moyenne entre le pic de pollution et la hausse du nombre de cas enregistrés, ce qui pourrait correspondre à la durée d'incubation du virus.

Au Royaume-Uni, les travaux de Travaglio *et al.*² prennent en compte des éléments tels que la densité de population, l'âge ou le revenu moyen dans les zones étudiées. Les résultats montrent que les jours de forte pollution (surtout en PM_{2,5}) le nombre de cas de Covid-19 peut augmenter jusqu'à 12 %.

De nombreuses autres études ont suivi, la majorité relevant de l'analyse statistique et calculant des corrélations spatiales entre les concentrations atmosphériques des principaux polluants réglementés et le taux de contamination par le virus. Leurs résultats vont dans le même sens : **les zones géographiques où le virus circule le plus correspondent aux zones avec les plus forts taux de pollution, notamment en PM_{2,5} et en NO₂.**

Les rapporteurs appellent cependant à la prudence vis-à-vis de ces résultats, qui sont issus de modélisations et de calculs de corrélation et dont l'interprétation doit être pondérée par la considération de certains facteurs sources de biais : densité de population, maladies chroniques, tabagisme, composition des familles par exemple. Par exemple, les zones où la pollution est la plus forte sont, dans la majorité des cas, des centres urbains denses, où la transmission du virus est plus élevée du fait des regroupements.

Les pics de pollution sont très fréquents pendant la transition entre la fin de l'hiver et le début du printemps, les conditions météorologiques, souvent anticycloniques³, étant favorables et les sources de pollution comme le chauffage résidentiel non performant étant encore actives. En 2020, cette période correspondait aussi à l'arrivée de l'épidémie en Europe, juste avant les différents confinements nationaux.

¹ Dragone, R.; Licciardi, G.; Grasso, G.; Del Gaudio, C.; Chanussot, J. *Analysis of the Chemical and Physical Environmental Aspects that Promoted the Spread of SARS-CoV-2 in the Lombard Area*. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 1226. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031226>

² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120365489>

³ *Lorsqu'un anticyclone s'installe, l'air le plus proche du sol se refroidit par rayonnement nocturne tandis que l'air se réchauffe en altitude. L'air froid étant plus dense, il se retrouve « plaqué » au sol. C'est ce qu'on appelle une inversion thermique. L'absence de vent empêche le brassage de l'air froid proche du sol, qui cumule alors les polluants et crée des conditions favorables aux épisodes de pic de pollution.*

Les zones décrites dans ces études, souvent industrielles, ont été sujettes à des pics temporaires, mais elles sont aussi chroniquement polluées. L'interprétation des résultats doit là aussi rester prudente, même si les effets sanitaires à court terme des polluants sont avérés : les effets observés peuvent aussi résulter d'une exposition chronique aux particules fines et au dioxyde d'azote.

Enfin, les rapporteurs rappellent que toutes ces études sont des modélisations. Dans ce cadre, il est difficile de s'affranchir des différents biais déjà évoqués.

C'est pourquoi les rapporteurs recommandent de mettre en place des études sur cohorte pour mieux explorer ces phénomènes dans leur pleine mesure.

2. L'exposition chronique à la pollution : facteur de comorbidité ?

Comme dit précédemment, les effets délétères des polluants atmosphériques sur la santé résultent non seulement des épisodes aigus, ayant des conséquences à court terme, mais aussi de l'exposition chronique. Celle-ci favorise notamment l'inflammation des tissus pulmonaires et affaiblit le système immunitaire. Or des muqueuses inflammées seraient plus perméables et favoriseraient la pénétration du virus dans l'organisme.

Le département « Biostatistiques » de l'école de santé publique de l'université de Harvard s'est penché sur le sujet¹ en 2020 et a établi un lien entre pollution chronique et hausse des cas graves et létaux de Covid-19. Ses résultats montrent que quand la concentration en PM_{2.5} augmente de 1 µg/m³ sur le long terme, le taux de mortalité augmente de 11 %.

D'autres études (Pozzer et al., 2020) ont montré qu'environ 15 % des décès dus à la Covid-19 dans le monde peuvent être la conséquence d'une exposition sur le long terme à la pollution de l'air, notamment aux particules fines². Plus précisément, la proportion serait de 19 % en Europe et de 18 % en France, dont respectivement 13 % et 11 % liés à la pollution des énergies fossiles.

Ainsi, l'exposition à une forme chronique de pollution de l'air peut favoriser l'évolution vers une forme grave de Covid-19, voire le décès. Ici encore, les études reposent sur des modélisations qu'il conviendrait de compléter par des études épidémiologiques.

¹ Wu et al., *Sci. Adv.* 2020, DOI: 10.1126/sciadv.abd4049

² <https://academic.oup.com/circvascres/article/116/14/2247/5940460>

3. Les mécanismes biologiques à l'œuvre

En complément de ces études statistiques, quelques travaux s'intéressent aux mécanismes biologiques qui pourraient être à l'œuvre. Par exemple, la pollution de l'air « *augmenterait l'activité d'un récepteur, appelé ACE2, situé à la surface des cellules et connu pour être impliqué dans la manière dont le Covid-19 infecte les patients* ». ¹

L'exposition chronique à des polluants tels que les PM_{2.5} ou le dioxyde d'azote favoriserait la surexpression de l'enzyme ACE2 située sur la face externe des membranes plasmiques des cellules de l'appareil respiratoire². Or l'ACE2 est aussi le récepteur de fixation de la protéine Spike du Sars-Cov-2³. Une exposition chronique à ces polluants faciliterait ainsi l'entrée du virus au sein des cellules et augmenterait le risque de développer des formes graves de Covid-19.

En parallèle, de nombreuses études *in vitro* identifient l'exposition chronique aux polluants comme un facteur d'affaiblissement du système immunitaire, plus particulièrement au sein de l'appareil respiratoire. Par exemple, l'exposition aux PM_{2.5} et à l'ozone induit un stress oxydatif et la formation de dérivés réactifs de l'oxygène au sein du liquide de la muqueuse épithéliale des voies respiratoires, menant à l'épuisement de nos défenses naturelles telles que les antioxydants et les surfactants⁴. De même, respirer des particules de combustion semble diminuer les taux d'interféron gamma dans la muqueuse nasale, dont les propriétés antivirales sont reconnues⁵. Enfin, l'exposition au NO₂ ou à des particules ultrafines de combustion serait à l'origine d'une diminution de l'activité de phagocytose des macrophages⁶, éléments essentiels de notre immunité.

On notera que les particules fines peuvent aussi être d'origine naturelle, comme dans les épisodes de remontées de poussières de sable venant du Sahara. En février 2021, une hausse du nombre de cas de Covid a été observée dans un hôtel de Tenerife, aux Canaries, qui se trouvait sur la trajectoire d'une tempête de sable saharienne⁷. Cependant, **il est très probable que les particules fines issues d'activités de combustion sont les plus toxiques et les plus à même de perturber la réponse immunitaire.**

¹ https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/11/03/Covid-19-la-mauvaise-qualite-de-l-air-facteur-de-risques-supplementaires_6058298_3244.html

² Païtal, Agrawal, « Air pollution by NO₂ and PM 2.5 explains Covid-19 infection severity by overexpression of angiotensin-converting enzyme 2 in respiratory cells : a review. »

³ Sungnak, Huang, Bécavin et al., « SARS-CoV-2 entry factors are highly expressed in nasal epithelial cells together with innate immune genes. »

⁴ Lakey, Berkemeier, Tong H et al., « Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. »

⁵ Rebuli, Speen, Martin et al., « Wood smoke exposure alters human inflammatory responses to viral infection in a sex-specific manner: a randomized, placebo-controlled study. »

⁶ Cienciewicki, Jaspers, « Air pollution and respiratory viral infection. »

⁷ M. Rohrer et al., Peaks of Fine Particulate Matter May Modulate the Spreading and Virulence of Covid-19 ; *Earth Systems and Environment* (2020) 4:789–796 <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00184-4>

Ainsi, même si les premières études cherchant à établir un lien entre pollution de l'air (pics de pollution ou exposition chronique) et hausse de la morbi-mortalité de la Covid-19 utilisent principalement des outils statistiques pouvant être assortis de biais, les connaissances de longue date sur les conséquences sanitaires des principaux polluants et les mécanismes biologiques impliqués lors d'une infection par le virus SARS-CoV-2 sont en faveur de cet argument. Les particules fines et le dioxyde d'azote, de par leur action abrasive des muqueuses respiratoire et leur activité inflammatoire, sont les plus à craindre. En considérant globalement toutes les études, il semblerait qu'une hausse de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration en particules fines, notamment 2,5, amène à une hausse de la mortalité d'environ 10 %. De tels chiffres doivent inciter à poursuivre les recherches sur ce sujet, notamment par des études de cohorte.

C. TRANSPORT DU VIRUS PAR LES PARTICULES FINES

1. Les particules fines comme possible support de diffusion du virus

D'autres études scientifiques font état d'une hausse du nombre de cas de Covid-19 après des épisodes de forte pollution de l'air, sans qu'il s'agisse forcément de cas graves ou mortels. L'hypothèse a alors été avancée que **les polluants, notamment les particules fines, joueraient un rôle dans le transport et la transmission du virus.**

Tout un écosystème microbien vit dans l'air qui nous entoure et il est établi que les particules fines peuvent transporter des micro-organismes, appelés alors bioaérosols.

Des études antérieures à la pandémie de Covid-19 ont documenté les possibles liens entre les caractéristiques des particules fines présentes dans l'air (taille, composition) et l'écosystème microbien associé¹. Les échantillons d'air chargés en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ contenaient le plus d'agents microbiens pathogènes. De plus, la taille semble jouer un rôle car les échantillons riches en PM_{10} ne présentaient pas la même diversité que les échantillons riches en $\text{PM}_{2,5}$, même si la composition des particules fines peut aussi être déterminante. D'autres conditions environnementales influencent les caractéristiques de la communauté microbienne, comme les concentrations en ozone et en monoxyde de carbone et en humidité relative. **Les particules fines peuvent donc interagir avec l'écosystème microbien atmosphérique, selon leur taille et leur composition.**

Cependant, la communauté scientifique est plutôt d'avis que ce fait établi pour les micro-organismes ne vaut pas pour le SARS-CoV-2 et qu'il est donc probable que les polluants de l'air ne jouent aucun rôle dans le transport du virus.

¹ Liu H, Zhang X, Zhang H, Yao X, Zhou M, Wang J, He Z, Zhang H, Lou L, Mao W, Zheng P, Hu B. Effect of air pollution on the total bacteria and pathogenic bacteria in different sizes of particulate matter. *Environ Pollut.* 2018 Feb;233:483-493. doi: 10.1016/j.envpol.2017.10.070. Epub 2017 Nov 5. PMID: 29101891.

Pour qu'un tel rôle existe, il faudrait que l'aérosol portant le virus coagule avec une particule fine de pollution, que les conditions extérieures conservent au virus son pouvoir infectieux sur une distance donnée, et que les particules infectées soient inhalées. Pour que la dose potentiellement inhalée soit suffisamment infectieuse, les probabilités sont faibles. Ces différents points doivent être examinés successivement.

2. Transmission du SARS-Cov-2 par aérosols et possible interaction avec les particules fines

Les virus, en particulier le SARS-CoV-2, peuvent se transmettre de différentes manières. Les principales sont le contact direct avec la bouche, le nez, ou les muqueuses des yeux et les modes de transmission dits aéroportés. Dès le début de la pandémie, le Haut conseil de la santé publique l'explicitait dans ses avis : « *Les principales modalités de transmission du SARS-CoV-2 sont les suivantes : - transmission directe (par inhalation de gouttelettes lors de toux ou d'éternuement par le patient), - et transmission par contact (contact avec la bouche, le nez, ou les muqueuses des yeux)* »¹.

Dans les modes aéroportés, la transmission peut intervenir via les **gouttelettes**, de taille supérieure à 5 µm – émises par des personnes contaminées lorsqu'elles parlent, toussent, éternuent – ou **les aérosols**, de taille inférieure à 5 µm. La taille du support de transmission (gouttelette ou aérosol) est un paramètre important de sa stabilité et sa capacité à transporter le virus².

C'est donc l'étude de la transmission par aérosols qui permettra d'infirmier ou de confirmer l'hypothèse que les particules fines PM_{2,5} sont des vecteurs du virus.

Le Haut conseil pour la Santé publique admet que « *la respiration simple émet 10 à 10⁴ particules par litre d'air expiré avec une prédominance des particules de diamètre inférieur à 1 µm* » mais rappelle que « *dans l'air extérieur l'effet de dilution va être prépondérant* ».

La physique des aérosols va dans ce sens : la probabilité qu'une particule fine et un aérosol contenant de la charge virale se rencontrent et coagulent en une seule particule est très faible³. En dessous d'une concentration de dizaines de milliers de particules par cm³, la probabilité de coagulation de PM est presque négligeable et diminue rapidement au fil du temps. Or il est très rare de trouver ce type de concentration, même lors d'un pic de pollution. De telles valeurs sont

¹ <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=808>

² *D'autres paramètres physico-chimiques peuvent affecter la stabilité ou la capacité d'un aérosol pouvant transporter un virus : la température, l'humidité, l'exposition aux rayons UV solaires, le pH, le type de virus etc...*

³ <https://www.allenvi.fr/allenvi/actualites/archives-2020/a-propos-du-lien-entre-la-pollution-atmospherique-et-la-propagation-du-sars-cov2>

principalement mesurées à proximité d'une source d'émission (pot d'échappement, cheminées) mais le gradient spatial de concentration, donc la dilution en fonction de la distance à la source, est important.

Enfin, « *la probabilité qu'une particule aéroportée contenant des virus soit inhalée avec une charge infectante suffisante paraît peu probable en dehors du champ proche, dans une foule par exemple* ».

3. Les conditions climatiques propices à la survie du virus sont aussi celles propices aux pics de pollution

Il est assez bien établi que les conditions climatiques jouent un rôle dans la survie du virus en extérieur. Les principaux paramètres sont la température, l'humidité relative et le rayonnement UV.

Ce dernier possède un effet neutralisant sur le virus. Comme il favorise également la formation d'ozone, de nombreuses études ont trouvé des corrélations négatives entre la concentration atmosphérique en ozone et la circulation du virus.

Le maintien des gouttelettes en suspension dans l'air intervient dans un domaine délimité de température et d'humidité relative. Les gouttelettes s'évaporent dans une atmosphère chaude et sèche ; elles tombent au sol dans une atmosphère chaude et humide.

En France, l'Institut Pasteur et l'équipe du Pr Manuguerra travaillent sur les conditions environnementales propices à la survie des virus en extérieur, notamment le virus de la grippe. Ils prennent en compte des paramètres tels que la température, l'humidité ou le pH. Leurs résultats relatifs au SARS-CoV-2 montrent que le virus survit mieux dans des conditions de basses températures et basse humidité, donc en hiver, ce qui suggère une dimension saisonnière de l'épidémie. Par exemple, le simple fait de passer d'une température de 35 °C à 25 °C permet au virus de survivre 4 jours supplémentaires.

En parallèle, l'entreprise Predict a calculé le domaine optimal de température et d'humidité qui permet aux gouttelettes et aérosols de rester en suspension plus longtemps, donc de se propager sur de plus longues distances (Figure 3).

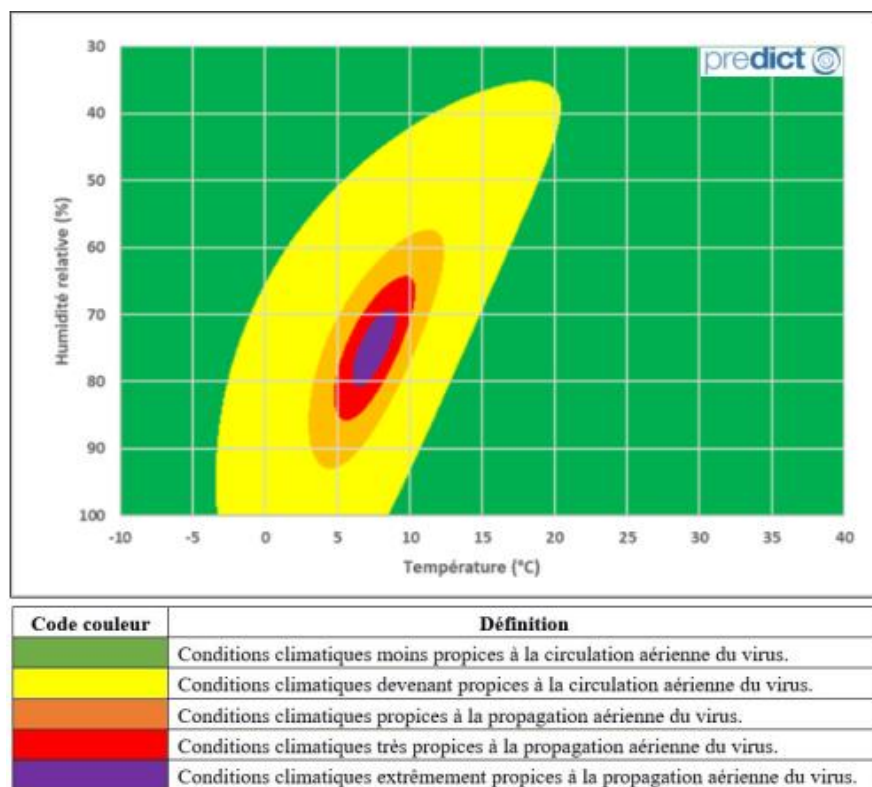


Figure 3 : Relation entre conditions climatiques (température et humidité relative) et propagation aérienne du virus (source : Predict¹).

Ainsi, une température moyenne comprise entre 5 et 10° C et une humidité relative entre 65 et 85 % constituent les conditions physiques les plus propices à la circulation du virus. Les rapporteurs rappellent à cet égard que des basses températures correspondent souvent à des situations dites anticycloniques très propices aux pics de pollution.

Il apparaît que les conditions météorologiques associées aux pics de pollution sont aussi les plus propices à la circulation du virus, ce qui peut aussi expliquer les corrélations montrées par de nombreuses études statistiques.

En définitive, l'hypothèse d'un transport du virus par des particules fines n'est pas soutenue par les études scientifiques disponibles à ce jour. Des corrélations ont bien été trouvées entre la circulation du virus et les pics de pollution, mais elles ont reçu des explications convaincantes par les conditions de température et d'humidité relative. Les effets de dilution jouent en fait un rôle prépondérant pour le transport du virus en extérieur. En milieu clos, ces effets deviennent négligeables, ce qui peut modifier la dynamique de contamination.

¹ Alix Roumagnac, Eurico de Carvalho Filho, Raphaël Bertrand, Anne-Kim Banchereau, Guillaume Lahache, Étude de l'influence potentielle de l'humidité et de la température dans la propagation de la pandémie COVID-19, Médecine de Catastrophe – Urgences Collectives, 2021

II. TRANSMISSION DU SARS-COV-2 EN MILIEU CONFINÉ ET QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

A. LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR ET SES EFFETS SANITAIRES

Les problématiques de pollution concernent aussi l'air dit intérieur, dans des espaces confinés comme les habitations, les transports ou les établissements recevant du public¹. Les polluants de l'intérieur proviennent de différentes sources (Figure 4) :

- Les activités des occupants (ménage, cuisine, tabagisme) ;
- Les revêtements et matériaux de construction (décoration, peintures, colles) ;
- L'ameublement (bois aggloméré, vernis) ;
- Les appareils à combustion (chaudières, cheminées, poêles) ;
- Les animaux et plantes (acariens, allergènes, moisissures) ;
- L'environnement extérieur (sols contaminés, polluants extérieurs).

Ces sources émettent principalement des COV (benzène, formaldéhydes) ou des particules fines. Des appareils à combustion mal entretenus peuvent aussi émettre du monoxyde de carbone.

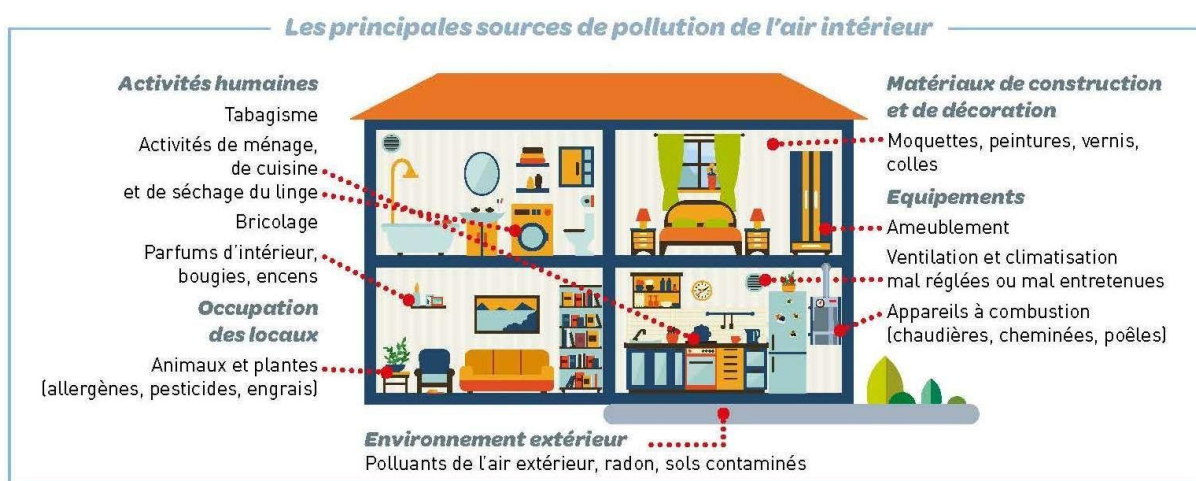


Figure 4. Les principales sources de pollution de l'air intérieur (source : <https://www.grand-est.ars.sante.fr/qualite-de-lair-interieur-7>)

Les conséquences sanitaires sont similaires à celles induites par les polluants de l'air extérieur (irritation des voies respiratoires, asthme) mais il faut y ajouter les potentiels effets cancérigènes des certaines substances chimiques

¹ Établissements recevant du public ou ERP

(solvants, métaux lourds, etc.). Ces effets sont pourtant souvent sous-estimés ou peu pris en compte alors que nous passons en moyenne environ 80 % de notre temps en milieu intérieur¹ et qu'il est conseillé d'aérer les pièces au moins 10 minutes par jour². Pour mémoire, la surveillance périodique de la qualité de l'air intérieur dans les ERP est obligatoire dans les crèches, écoles maternelles et élémentaires (depuis janvier 2018), collèges et lycées (depuis janvier 2020), et sera obligatoire à partir de janvier 2023 pour les établissements sportifs³. Les principaux axes de gestion de la qualité de l'air intérieur concernent la réduction des sources d'émission, la ventilation et l'aération.

Des agents pathogènes (virus, bactéries, champignons) peuvent aussi proliférer dans les espaces confinés, souvent chauds et humides car peu aérés ; de plus, l'effet de dilution devient presque négligeable en milieu clos, ce qui peut favoriser le transport de ces agents – y compris le virus SARS-CoV-2 – par les polluants de l'air intérieur.

Les agents pathogènes sont souvent de même taille que les polluants, les méthodes de gestion des polluants de l'air intérieur peuvent donc aussi s'appliquer. Dans le cas de l'épidémie de Covid-19, il s'agit alors de savoir si la charge virale peut se trouver durablement en suspension dans l'air, ce qui rejoint la question de la potentielle contamination par aérosols.

B. DES MODES DE TRANSMISSION DIFFÉRENTS EN MILIEU CONFINÉ ?

1. L'importance de la transmission par aérosols en milieu confiné

De récentes études ont cherché à déterminer si les dynamiques de contamination en milieu clos étaient différentes de celles en milieu extérieur⁴. Il s'agit notamment de quantifier l'importance de la contamination par aérosols en intérieur, car la suspension aérienne de particules porteuses de charge virale pourrait contaminer plusieurs personnes présentes dans une même pièce même si celles-ci respectent les mesures de distanciation. La contamination par aérosols pourrait aussi expliquer les « événements de super-propagation » tels que celui survenu sur le navire de croisière *Diamond Princess*. Cet effet est avéré pour d'autres maladies comme la tuberculose, la grippe ou le virus SARS-CoV-1.

¹ <https://www.grand-est.ars.sante.fr/qualite-de-lair-interieur-7>

² Pour en savoir plus sur les bons gestes de gestion de l'air intérieur : https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/a4_airinterieur.pdf

³ Ces établissements doivent être inspectés tous les 7 ans par le propriétaire ou l'exploitant du bâtiment, avec réalisation de campagne de mesures de certains polluants et mise en œuvre d'action de prévention : <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/batiments/article/surveillance-de-la-qualite-de-l-air-interieur-dans-les-etablissements-recevant>

⁴ Pour rappel, pour la Covid-19, les modes de contamination sont la transmission par contact direct ou les modes aéroportés (par gouttelettes ou aérosol).

L'ANSES s'est notamment penchée sur le sujet pendant l'été 2021¹. L'étude montre que le risque de contamination par aérosols en milieu confiné est réel mais il reste difficile de savoir si ce risque est plus ou moins important que ceux résultant du contact direct et de la transmission par gouttelettes. Cependant, même s'il ne s'agit pas du principal mode de contamination, il doit absolument être mieux pris en compte, surtout dans les ERP ou dans les lieux où se déroulent des activités propices à l'émission d'aérosols : parole, chant...

2. Les événements de « super-propagation »

La possibilité d'une propagation du virus SARS-CoV-2 par aérosols a mis longtemps à prendre corps dans la communauté scientifique internationale et, par voie de conséquence, au sein des agences de santé et de l'OMS. Cependant, quelques événements dits de « super-propagation » ont amené des arguments en faveur de ce mode de contamination, dont l'épisode dans un restaurant à plusieurs étages de Wuhan et celui du bateau de croisière *Diamond Princess*. Dans les deux cas, une rétro-analyse des événements, à l'aide de témoignages et de vidéos de surveillance, a permis de mettre en évidence des cas de contamination « à distance » dont l'explication la plus convaincante est une transmission par aérosols. Pour le *Diamond Princess*, plus de 700 personnes ont été testées positives au Covid-19 et une modélisation avance que plus de 50 % des contaminations ont été dues aux aérosols.

C. L'IMPORTANCE DE LA VENTILATION ET DE L'AÉRATION DES PIÈCES

La transmission par aérosols peut être réduite par des mesures de renouvellement de l'air intérieur, comme peut l'être la concentration des polluants de l'air intérieur. C'est pourquoi **l'aération régulière des pièces est devenue un geste barrière**² qui permet d'éviter l'accumulation de particules fines et d'aérosols susceptibles de transporter le virus.

Dans un avis datant du 28 avril 2021³, le Haut conseil pour la santé publique⁴ (HCSP) se montre favorable aux mesures de ventilation et « recommande d'effectuer une aération des espaces clos des ERP en présence des personnes et d'ouvrir les fenêtres au moins 5 minutes toutes les heures ». Cette durée et cette fréquence peuvent varier selon le volume de la pièce, le nombre de personnes présentes, les activités effectuées ou encore la ventilation déjà en place.

L'audition publique du 4 novembre a permis de rappeler que les règles d'hygiène et de sécurité au travail, notamment celles prévues par le code du

¹ <https://www.anses.fr/fr/content/Covid-19-quelle-viabilit%C3%A9-du-virus-sars-cov-2-dans-l%E2%80%99air>

² <https://www.gouvernement.fr/info-coronavirus/gestes-barrieres>

³ <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009>

⁴ Plus particulièrement, le groupe de travail « Covid-19 : aération, ventilation et mesure du CO₂ dans les ERP ».

travail, imposent la mise en place d'une ventilation fonctionnelle et efficace dans les lieux idoine. Elle a également souligné qu'il est très opportun d'aérer les pièces avant l'entrée du public, de façon à ce que celui-ci bénéficie d'un air renouvelé dès son arrivée en salle.

D. LA MESURE DE CO₂: UN BON INDICATEUR DE LA VENTILATION D'UNE PIÈCE

1. Principe et intérêt de la mesure du niveau de CO₂ dans une pièce

Il est donc recommandé d'aérer régulièrement, mais il peut, en pratique, s'avérer difficile de déterminer la fréquence et la durée de l'aération, car cela peut dépendre du volume de la pièce, du nombre de personnes présentes, de l'activité etc. **Un bon indicateur du renouvellement de l'air dans une pièce est le niveau de dioxyde de carbone.** Facilement mesurable à l'aide de petits capteurs, le dioxyde de carbone est émis lors de la respiration et s'accumule dans la pièce au fil du temps. Même s'il n'est pas défini comme un polluant classique, un taux élevé de CO₂ correspond à une aération insuffisante. La concentration atmosphérique en CO₂ est, en moyenne, de 400 ppm¹ ; plus un espace est clos, mal ventilé, et contient un grand nombre de personnes, plus la concentration en dioxyde de carbone est importante et croissante. Une exposition à un fort taux de CO₂ (supérieur à 1 000 ppm) pendant une longue durée peut être responsable de gênes non négligeables telles que maux de tête, somnolence, baisse de la concentration ou baisse de l'activité cognitive².

2. Lignes de conduite pour l'usage des capteurs de CO₂

Le collectif « Projet CO₂ », qui regroupe des chercheurs de différents horizons, a mis au point une méthodologie visant une utilisation efficace et pertinente des capteurs de CO₂³. Par ailleurs, il a présenté une grille de lecture des situations possibles en matière de concentration en CO₂ :

« Le lien entre la qualité de l'air d'une pièce et la concentration en CO₂ est donné par les valeurs caractéristiques suivantes :

- *< 800 ppm : correspond à une qualité d'air excellente et c'est une recommandation du Haut conseil pour la santé publique. Cela constitue donc une valeur "cible" à atteindre ;*
- *entre 800 et 1 000 ppm : correspond à une qualité d'air moyenne ;*

¹ PPM ou partie par million, soit une fraction d'un millionième.

² D'après une étude de 2018 de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 36 % des écoles maternelles ou primaires possèdent au moins une classe avec une concentration en CO₂ à environ 1 700 ppm.

³ <https://projetco2.fr/pourquoi-mesurer-co2>

- **entre 1 000 et 1 500 ppm** : correspond à une qualité d'air modérée. Cela correspond à des valeurs trop élevées en contexte Covid-19 ;
- **> 1 500 ppm** : correspond à une qualité d'air basse. Cela correspond à des valeurs beaucoup trop élevées en contexte Covid-19. »

Les rapporteurs remarquent que des valeurs caractéristiques plus faibles de la concentration en CO₂ peuvent être envisagées. En effet, le ministère du Travail, de l'emploi et de l'insertion recommande, depuis le 29 novembre 2021, une action de renouvellement de l'air dès 800 ppm et une évacuation du local dès 1000 ppm¹.

Il existe différentes technologies de mesure de CO₂, mais seule la technologie de spectrométrie d'absorption infrarouge non dispersif (ou NDIR pour *Non-Dispersive InfraRed*) est recommandée. Un guide d'achat est disponible sur le site du collectif Projet CO₂².

Le prix moyen d'un capteur de CO₂ de bonne qualité, dont la technique de mesure est recommandée par les autorités, est de plusieurs centaines d'euros. L'équipement des ERP peut représenter un investissement lourd pour les collectivités locales. Il faut cependant rappeler que les préconisations de plusieurs aérations par heure peuvent aussi être contraignantes et difficiles à respecter et que ces capteurs peuvent faciliter l'acceptation de ces mesures.

L'utilisation de capteurs de CO₂ semble faire l'unanimité au sein des différentes instances scientifiques et de santé publique. Le HCSP « indique que le taux de renouvellement de l'air peut être approché facilement par la mesure de la concentration en dioxyde de carbone dans l'air à des points et des périodes représentatives en période d'occupation »³. L'Académie des Sciences partage l'avis du HCSP sur la question des mesures de CO₂⁴ et encourage l'installation de capteurs « disponibles, fiables et d'un coût modéré ».

Les rapporteurs recommandent l'installation et l'usage des capteurs de CO₂ dans les ERP afin de faciliter la mise en place des mesures d'aération et de diminuer le risque de contamination par aérosols dans la lutte contre le virus SARS-CoV-2.

Dans un contexte plus global, au-delà de la lutte contre l'épidémie de Covid-19, les rapporteurs recommandent aussi l'usage de capteurs de CO₂ notamment dans la lutte contre les épidémies des maladies respiratoires et saisonnières telles que la grippe ou la bronchiolite.

¹ <https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/protocole-nationale-sante-securite-en-entreprise.pdf>

² <https://projetco2.fr/capteurs>

³ <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009>

⁴ https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/2021_06_11_Avis_CO2.pdf

Ces épidémies dépendent des conditions environnementales, reviennent chaque année et, dans leur cas précis, le rôle de la transmission par aérosols est avéré. L'aération guidée par l'installation de capteurs de CO₂ peut donc aider à lutter contre ces épidémies. Pour rappel, le virus influenza de la grippe provoque en France entre 5000 et 15 000 morts par an et est responsable de plus de 4 millions de journées de travail perdues.

E. LES PURIFICATEURS D'AIR ET LEUR RÔLE DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉPIDÉMIE

En parallèle, **se développe le marché des purificateurs d'air**, censés aspirer et « nettoyer » l'air au moyen de filtres (mécaniques ou chimiques), sans ouvrir les fenêtres. Ils seraient surtout indiqués dans le cas d'un pic de pollution en extérieur, puisqu'ouvrir les fenêtres pourrait alors être contre-productif.

La technologie existait déjà avant la pandémie de Covid-19, pour traiter l'air intérieur et ses différents polluants. L'efficacité de certains dispositifs rend possible leur utilisation pour assainir l'air ambiant des agents pathogènes, et donc potentiellement le virus SARS-CoV-2.

Selon le Haut conseil à la santé publique¹, un dispositif de « purification » d'air comporte une technologie de traitement d'air et un ventilateur qui brasse l'air de la pièce par des entrées d'aspiration et de soufflage d'air. Le traitement de l'air consiste en le piégeage et/ou la destruction d'éléments indésirables spécifiques au dispositif. Il vise à éliminer ou réduire la présence dans l'air ambiant de gaz ou particules (contaminants chimiques, particules inertes ou microorganismes).

On distinguera les unités mobiles de purification d'air – qui sont l'objet de la présente étude – des systèmes de purification d'air associés aux infrastructures de chauffage, ventilation et climatisation.

1. Classification des dispositifs mobiles de purification de l'air

En septembre 2017, l'ANSES publiait un avis sur l'identification et l'analyse des différentes techniques émergentes d'épuration d'air intérieur² et proposait la classification présentée ci-après :

¹ Avis du 21 mai 2021 rendu par le HCSP à la DGS :

<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1014>

² <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf>

a. Purification de l'air par piégeage

i. Filtration

La filtration consiste en le piégeage physique ou mécanique des particules de l'air ambiant. Ce piégeage repose sur l'utilisation d'un « média », support fibreux sur lequel est réalisée la filtration.

Il existe différents niveaux de filtration. Dans le cadre de la lutte contre la Covid-19, les autorités sanitaires recommandent l'utilisation de filtres dits HEPA, à très haute qualité de filtration, et plus particulièrement les HEPA 13 et 14¹.

ii. Ionisation et filtration électrostatique

L'ionisation d'un atome ou d'une molécule consiste à lui arracher un ou plusieurs électrons pour le transformer en ion. Les ions ainsi formés sont ensuite précipités sur des surfaces ou sur des électrodes chargées.

Dans le cadre de la lutte contre l'épidémie de Covid-19, les systèmes de purification de l'air à ionisation commercialisés reposent sur l'usage d'électrodes chargées : les ions formés peuvent se fixer aux particules virales pour les précipiter et/ou neutraliser leur potentiel infectieux en réagissant avec leurs protéines de surface.

b. Purification de l'air par oxydation ou destruction

i. Utilisation d'un plasma

L'état plasma est celui d'un gaz partiellement ou entièrement ionisé, dont la charge électrique totale est nulle. Sa formation nécessite la réunion de conditions particulières, permises par l'utilisation d'un champ électrique de forte intensité ou de températures élevées.

Dans le cadre de la lutte contre l'épidémie de Covid-19, les plasmas utilisés par certains dispositifs de purification de l'air sont dits « froids », c'est-à-dire à une température proche de la température ambiante. Ces plasmas génèrent des dérivés réactifs de l'oxygène (tels des radicaux libres), censés permettre l'élimination du virus.

ii. Ozonation

L'épuration de l'air par ozonation repose sur la génération d'ozone, espèce chimique dont la forte réactivité et l'instabilité peuvent être à l'origine de différentes réactions de décomposition.

¹ HEPA pour « High efficiency particulate air ». Le niveau 13 ou 14 désigne le pouvoir de filtration du filtre : un filtre HEPA 13 ne laisse passer que 50 particules de 0,1 micron par litre d'air (efficace à 99.95 %) et un filtre HEPA 14 ne laisse passer que 5 particules de 0,1 micron par litre d'air (efficace à 99.995 %).

2. Les recommandations du HSCP

Le HSCP recommande *« de n’implanter que des unités mobiles de purification de l’air par filtration HEPA H13 ou H14 ou taux de filtration équivalent »*.

En effet, les appareils utilisant des traitements physico-chimiques de l’air tels que la désinfection par UV, plasma, ozonation ou catalyse souffrent d’une *« impossibilité en utilisation réelle d’analyser la qualité de l’air intérieur et détecter les problèmes de dégradation incomplète possible des polluants conduisant à la formation de composés potentiellement dangereux pour la santé »*. Ces techniques peuvent produire de l’ozone, gaz hautement irritant, et, plus généralement, des polluants secondaires dont les effets sanitaires ne doivent pas être négligés.

Les filtres mécaniques HEPA se contentent de filtrer l’air et n’initient aucune réaction physico-chimique susceptible de produire des polluants.

C’est pourquoi, pour les besoins de la lutte contre la Covid-19 et dans le but plus général d’une amélioration de la qualité de l’air intérieur, les rapporteurs conseillent l’utilisation de purificateurs d’air équipés de filtres HEPA 13 ou 14 et estiment qu’il convient de rester prudent quant à l’utilisation des autres techniques, notamment dans les ERP.

Les rapporteurs rappellent que l’amélioration de la qualité de l’air intérieur doit reposer en priorité sur un renouvellement de l’air résultant de la ventilation et de l’aération, dès lors que la qualité de l’air extérieur le permet, et que l’usage de purificateurs d’air doit être vu comme une mesure complémentaire.

F. PRÉCONISATIONS NATIONALES ET PREMIÈRES EXPÉRIENCES

Dans le cadre de la lutte contre la Covid-19, le ministère de l’Éducation nationale a recommandé d’installer à la fois des capteurs de CO₂ et des purificateurs d’air dans les salles de classe : *« Nous encourageons les collectivités pour des capteurs de CO₂ et des purificateurs d’air (...) chaque fois que cela est pertinent »* a déclaré M. Jean-Michel Blanquer, ministre, dans un discours en date du 25 avril 2021.

Si l’utilisation de capteurs de CO₂ semble faire l’unanimité, l’Anses et l’APPA ont rendu un avis, respectivement en 2017 et en 2021, avec des conclusions critiques sur l’usage de purificateurs d’air. L’avis de l’APPA *« ne permet pas de recommander l’utilisation de ces appareils pour un objectif de réduire la transmission virale par aérosol »*. De même, l’Anses considère que les données scientifiques *« ne permettent pas de démontrer l’efficacité et l’innocuité en conditions réelles d’utilisation des dispositifs d’épuration de l’air »*.

En parallèle, l'association Respire, en partenariat avec la mairie du 9^e arrondissement de Paris, a mené une expérimentation dans deux écoles de l'arrondissement entre février et avril 2021. Cette expérimentation ne s'inscrivait pas dans le cadre de la lutte contre la Covid-19 mais dans celui du respect des directives européennes concernant la gestion de la qualité de l'air intérieur des ERP. **Les conclusions sont favorables à une utilisation combinée de capteurs de CO₂ et de purificateurs d'air** car l'étude montre une diminution de 20 à 30 % de la pollution aux particules fines lors de l'utilisation d'un purificateur¹. Ces résultats rejoignent les conclusions d'une étude allemande datant de fin 2020² qui testait des purificateurs avec filtre HEPA13 et trouvait que le taux d'aérosols avait diminué de 90 % après 30 minutes de fonctionnement de ces appareils.

*

* *

C'est sur la toile de fond formée par tous ces éléments que s'est déroulée l'audition publique du 4 novembre 2021 sur le thème « Transmission du virus dans les espaces confinés, rôle des capteurs de CO₂ et des purificateurs d'air », dont le compte rendu se trouve en annexe. Cette audition publique a permis d'approfondir nombre de sujets et les recommandations formulées par les rapporteurs visent à proposer une stratégie globale non seulement pour la prise en compte des interactions entre la pollution de l'air et l'épidémie de Covid-19 mais aussi, plus globalement, au service de la qualité de l'air dans les milieux confinés.

¹ <https://www.respire-asso.org/wp-content/uploads/2021/05/e%CC%81tude-respire-qualite%CC%81-air-inte%CC%81rieure-e%CC%81coles-9e-mai-2021-1.pdf>

² J. Curtius, M. Granzin & J. Schrod (2021) Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2, *Aerosol Science and Technology*, 55:5, 586-599, DOI: 10.1080/02786826.2021.1877257

RECOMMANDATIONS

1. Encourager la mise en place d'études épidémiologiques de cohorte afin d'améliorer la connaissance des effets de l'exposition chronique à la pollution de l'air sur la résistance au SARS-CoV-2 ;
2. Examiner la prise en compte des données atmosphériques telles que la température, l'humidité relative, le rayonnement UV et la pollution de l'air dans les modèles épidémiques, à la fois pour effectuer des prévisions à court terme et pour évaluer la saisonnalité de l'épidémie ;
3. Développer la pédagogie et la vulgarisation autour du transport et de la transmission du virus par aérosols, surtout en milieu confiné ;
4. Renforcer les politiques d'incitation au renouvellement de l'air dans les milieux clos, avec un accent particulier sur les ERP, en appuyant ces politiques par l'installation et l'usage généralisés de capteurs de CO₂ performants qui permettent de disposer d'un indicateur efficace. Cette mesure doit dépasser la lutte contre le Covid-19 et s'étendre à la prévention des épidémies saisonnières et respiratoires (grippe, bronchiolite) ;
5. Accompagner le développement des capteurs de CO₂ par un guide des bonnes pratiques, qui explique les manières d'utiliser le dispositif et alerte sur la nécessité de porter attention à la qualité de l'air extérieur avant l'ouverture des fenêtres ;
6. Mener une campagne nationale de tests d'efficacité des purificateurs d'air dans les ERP (écoles, EHPAD, établissements sportifs, etc.), en partenariat notamment avec le ministère de l'Éducation nationale et les collectivités territoriales, et dans un contexte global de gestion de la qualité de l'air intérieur afin de mettre en évidence une éventuelle valeur ajoutée par rapport aux simples mesures de ventilation. Cette campagne pourrait être menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) ;
7. Définir un cadre juridique national pour l'installation et l'utilisation des purificateurs d'air dans les ERP, listant les technologies autorisées et les obligations d'entretien ;
8. Favoriser les technologies utilisant des filtres HEPA 13 ou 14 en cas d'utilisation de purificateurs d'air ;
9. Rendre systématique les essais en conditions dites « réelles » de l'équipement complet formant l'unité mobile de purification d'air. Il ne s'agit pas de tester seulement le filtre en laboratoire mais l'intégralité de l'appareil afin de garantir la qualité du flux sortant ;

10. Définir des règles d'hygiène et sécurité nécessaires à la protection des personnels chargés de l'entretien des purificateurs et mettre en place une filière de gestion ou de recyclage des filtres usagés garantissant la protection de l'environnement.

EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques s'est réuni le jeudi 2 décembre 2021 pour examiner le projet de rapport sur « Qualité de l'air et Covid-19 : quelles interactions ? », présenté par M. Jean-Luc Fugit, député, et Mme Angèle Prévile, sénatrice, rapporteurs.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur. Le deuxième point de l'ordre du jour porte sur l'examen du rapport « Covid-19 et Pollution de l'air » dont Angèle Prévile et moi-même sommes rapporteurs. Je vais rappeler quelques éléments de contexte. Ce rapport résulte d'une saisine en date du 16 septembre dernier, émanant des commissions des affaires sociales et du développement durable de l'Assemblée nationale. Son adoption permettrait à la parole de l'Office d'être présentée lors de la réunion du Conseil national de l'air qui aura lieu dans quelques jours. J'ai l'honneur de présider bénévolement cette instance, au sein de laquelle le Sénat est représenté par Jean-François Husson.

Le rapport que nous présentons aujourd'hui est un approfondissement d'un premier travail conduit au printemps 2020. En effet, à l'issue du premier confinement, l'Office avait rendu publique une note intitulée « Pollution de l'air, gaz à effet de serre et crise du Covid-19 : quelles interactions ? » dont j'étais le rapporteur et qui s'intéressait à la fois à l'évolution de la pollution de l'air lors du confinement et à la pollution de l'air comme possible facteur aggravant de l'épidémie. Certaines informations étaient apparues dans la presse et nous avons alors souhaité donner un point de vue rigoureux sur l'état des connaissances de l'époque.

Différentes études avaient permis d'explorer avec précision le premier axe et d'en quantifier certains éléments, mais les études relevant du deuxième axe étaient insuffisantes pour conclure avec certitude, faute de données de long terme et d'analyses suffisamment complètes.

Plus d'un an et demi après le début de l'épidémie, les connaissances scientifiques sur la Covid-19 se sont améliorées, les études scientifiques ont été poursuivies et les mécanismes infectieux sont désormais mieux compris.

Le rapport présenté aujourd'hui explore principalement deux axes complémentaires. Tout d'abord, il examine les interactions entre la pollution de l'air extérieur et la dynamique de l'épidémie : les épisodes de pollution de l'air extérieur sont-ils à l'origine d'une recrudescence de cas de Covid-19 ou d'une plus forte sévérité des infections au virus ? Nous avons pour cela réalisé plusieurs auditions et échangé avec des médecins, des virologues, des épidémiologistes, des

spécialistes de la gestion des risques naturels, les autorités sanitaires ainsi que des associations. Dans un second temps, le rapport explore les liens entre la transmission du SARS-CoV-2 dans les milieux confinés et la qualité de l'air intérieur : quelles sont les conséquences sanitaires potentielles d'un air intérieur de mauvaise qualité ? Quels rôles peuvent jouer les dispositifs de mesure du dioxyde de carbone et les purificateurs d'air pour lutter contre la transmission du virus dans les milieux confinés ?

Cette seconde partie s'appuie principalement sur l'audition publique « Transmission du coronavirus dans les milieux confinés, capteurs de CO₂ et purificateurs d'air », qui a eu lieu le 4 novembre dernier. Elle a apporté de précieux éléments et a suscité l'intérêt au-delà des seuls membres de l'Office. La réception d'une trentaine de questions d'internautes et la mobilisation de nombreuses associations sur les réseaux sociaux nous l'ont confirmé.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, vice-présidente de l'Office, rapporteure. Nous avons exploré les interactions entre la pollution de l'air extérieur et la dynamique de l'épidémie, cherchant à savoir si les épisodes de pollution pouvaient être à l'origine d'une recrudescence du nombre de cas ou d'une plus grande sévérité des infections.

Comme vous le savez, l'air extérieur contient divers polluants, qui sont dits « atmosphériques ». Le réseau des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) surveille différents polluants réglementés ayant des effets avérés sur la santé et l'environnement.

Parmi ces polluants réglementés, plusieurs présentent un intérêt particulier : les oxydes d'azote, qui sont issus de la combustion et de la synthèse d'engrais chimiques et qui irritent fortement les voies respiratoires ; les particules fines, qui sont soit d'origine anthropique, en provenance de l'industrie, des transports et du chauffage, soit d'origine naturelle, issues des poussières du désert, du pollen, etc. Elles peuvent pénétrer dans l'appareil respiratoire et plus elles sont fines, plus elles sont susceptibles de pénétrer en profondeur, voire de passer dans la circulation sanguine. Enfin, il faut citer l'ozone des basses couches de l'atmosphère. Ce gaz est issu des activités humaines et il est très irritant pour les voies respiratoires

La pollution de l'air n'est pas anecdotique, ni un problème exclusivement environnemental, mais bien un sujet majeur de santé publique. Santé publique France a établi que la pollution aux particules fines, particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 microns, a été responsable en 2019 de 40 000 décès prématurés en France, soit 6% de la mortalité toutes causes confondues. L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) estime que 300 000 personnes sont mortes prématurément en 2019 des effets de la pollution de l'air, principalement à cause des particules fines.

En effet, les études de cohorte et les études *in vitro* montrent que l'exposition à la pollution de l'air, chronique ou temporaire, engendre des symptômes respiratoires, des symptômes cardio-vasculaires mais aussi une inflammation chronique à l'origine d'une baisse de la réponse immunitaire. Il est donc tout à fait légitime de s'interroger sur les effets de ces différents symptômes et d'une potentielle baisse de la réponse immunitaire, dans le contexte de la Covid-19.

Plusieurs études, menées en Chine, en Italie, dans la région de la Lombardie, ou au Royaume-Uni ont établi des corrélations spatiales entre les concentrations atmosphériques des principaux polluants réglementés et le taux de contamination par le virus : plus les taux de particules fines et de dioxydes d'azote sont élevés, plus le virus semble circuler.

Toutefois, nous devons faire preuve d'une grande prudence vis-à-vis de ces résultats : ils sont issus d'études purement statistiques et peuvent donc être très influencés par des facteurs qui n'ont pas été pris en compte tels que la densité de population, les maladies chroniques ou encore le tabagisme. Par exemple, une zone très dense aura tendance à être plus polluée, mais pourra aussi connaître une circulation du virus plus élevée du fait de la plus grande proximité entre individus.

C'est pourquoi nous recommandons de mettre en place des études de cohorte afin de mieux explorer ces phénomènes dans leur pleine mesure, en s'affranchissant des potentiels biais statistiques. C'est le sens de la première recommandation du rapport.

La pollution de l'air est significativement corrélée de façon positive avec l'activité épidémique, mais l'exposition chronique à la pollution est-elle un facteur de comorbidité ? En effet, l'inflammation des muqueuses respiratoires pourrait augmenter leur perméabilité au virus.

Des études s'appuyant sur des travaux de statistique et de modélisation ont montré que l'exposition à une forme chronique de pollution de l'air pouvait favoriser l'émergence d'une forme grave du Covid-19 et augmenter les chances de décès. Je réitère donc notre recommandation : des études épidémiologiques sont absolument nécessaires pour pouvoir établir ces faits avec certitude. Par ailleurs, plusieurs études *in vitro* identifient les particules fines issues des activités de combustion comme étant les plus toxiques et les plus à même de perturber la réponse immunitaire.

Nous avons également exploré la potentialité d'un transport du virus par les particules fines. Le SARS-CoV-2 peut se transmettre de différentes manières : par contact direct avec la bouche, le nez ou les muqueuses des yeux, ou de façon aéroportée. Dans les modes aéroportés, la contamination peut intervenir via les gouttelettes émises par la toux, de taille supérieure à 5 microns, et les aérosols, de taille inférieure. La question était de savoir si les particules fines pouvaient interagir avec les aérosols et faciliter leur transport.

Les phénomènes de dilution intervenant en milieu extérieur et la faible probabilité d'une coagulation entre une particule fine et un aérosol viral suggèrent que les particules fines ne peuvent pas être des vecteurs du virus.

Il apparaît que les conditions météorologiques associées aux pics de pollution sont aussi les plus propices à la circulation du virus, ce qui pourrait expliquer les corrélations précédemment observées. Différentes études menées par la société Predict ou l'Institut Pasteur visent à faire la lumière sur les liens éventuels entre les conditions météorologiques et l'activité épidémique. Ainsi, une température comprise entre 5 et 10 degrés et une humidité relative comprise entre 65 et 80% sont les conditions les plus propices à la circulation du virus.

À l'aune de l'actuelle reprise épidémique, coïncidant avec le retour du froid, nous recommandons d'examiner la prise en compte des données atmosphériques dans les modèles épidémiques, à la fois pour effectuer des prévisions à court terme mais aussi pour caractériser précisément la saisonnalité de l'épidémie.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur.
Après avoir abordé la question de la qualité de l'air extérieur, il convient de passer à celle de l'air intérieur, en examinant les conditions de la transmission du SARS-CoV-2 en milieu confiné et le rôle pouvant être joué par les capteurs de CO₂ et les purificateurs d'air pour lutter contre l'épidémie.

Le lien entre qualité de l'air extérieur et santé publique est bien connu, mais la qualité de l'air intérieur est un sujet qu'il faut également prendre en considération. En effet, les activités des occupants, comme fumer ou cuisiner, les vernis des meubles, les feux de cheminée, notamment quand le chauffage au bois est non performant, les peintures, les colles, les moisissures, ainsi que l'entrée de polluants extérieurs dans un milieu fermé sont autant de sources de polluants de l'air intérieur.

Ces sources émettent principalement des composés organiques volatils (COV) et des particules fines, dont les conséquences sanitaires sont similaires à celles induites par les polluants de l'air extérieur, en y ajoutant de potentiels effets cancérigènes. Alors que nous passons environ 80 à 90 % de notre temps en intérieur, chez nous, au travail, dans les écoles, dans les centres commerciaux, dans nos activités de loisirs, ces effets sont souvent sous-estimés.

Dans le cadre de l'épidémie de Covid-19, il s'agit de savoir si la charge virale peut se trouver durablement en suspension dans l'air, ce qui rejoint la question de la contamination par aérosols. Aussi, il apparaît nécessaire de trouver des solutions pour éliminer ces aérosols, donc d'examiner l'intérêt des purificateurs d'air et des capteurs de CO₂.

L'audition publique du 4 novembre a permis de réunir des épidémiologistes, des médecins, des associations, des industriels et des représentants de collectivités locales. Elle a apporté de nombreuses réponses à nos

questions mais aussi démontré à quel point ce sujet était sensible. En effet, au-delà de la question de la transmission par aérosols, qui peut paraître purement scientifique, l'enjeu consiste à lutter contre les contaminations dans les crèches, les établissements scolaires, les EHPAD et plus globalement au sein de tous les établissements recevant du public (ERP).

L'audition publique a mis en évidence l'importance de la transmission par aérosols en milieu confiné. Bien que la part de ces contaminations soit difficile à évaluer parmi l'ensemble des contaminations, le risque est réel et doit être mieux pris en compte, surtout dans les ERP et les lieux où se déroulent des activités propices à l'émission d'aérosols, par exemple à travers la prise de parole ou le chant.

Certes, l'aération des pièces est devenue un geste barrière, dans l'objectif d'éviter l'accumulation dans l'air de particules virales. Mais nous savons tous que cette aération est parfois peu appliquée, particulièrement en cette période hivernale.

L'audition a mis en lumière l'intérêt de la mesure du taux de dioxyde de carbone, qui est un bon indicateur du niveau de renouvellement de l'air dans une pièce. Un taux inférieur à 800 ppm en intérieur indique une bonne qualité d'air – même si cette concentration est plus élevée que celle mesurée en air extérieur qui est de l'ordre de 400 ppm – un taux entre 800 et 1000 ppm traduit une qualité d'air moyenne, nécessitant un renouvellement, et un taux supérieur à 1000 ppm correspond à une qualité de l'air modérée, nécessitant une aération immédiate dans le contexte de l'épidémie.

C'est pourquoi nous recommandons l'installation et l'usage de capteurs de CO₂ dans les ERP, afin de faciliter la mise en place et la systématisation des mesures d'aération. Ces capteurs permettraient à la fois d'avertir de façon pertinente lorsque l'air nécessite d'être renouvelé, mais aussi d'ancrer dans l'esprit de chacun la nécessité d'une aération régulière. Il s'agit d'un bon outil pédagogique, notamment chez les enfants. Il convient ainsi de rendre visible l'invisible grâce aux capteurs.

L'installation des capteurs de CO₂ s'inscrit dans un contexte plus global de lutte contre toutes les épidémies de maladies respiratoires et saisonnières telles que la grippe ou la bronchiolite, qui nécessitent elles aussi une aération. L'investissement associé à ces capteurs sera alors largement rentabilisé. Un rapport du Sénat de 2015 avait chiffré le coût de la pollution de l'air à 100 milliards d'euros par an pour la France, dont 20 milliards résultant de la pollution de l'air intérieur.

Le rôle des collectivités locales est majeur, celles-ci ayant la responsabilité des locaux scolaires, et il faudra donc les accompagner. Nous recommandons la rédaction d'un guide de bonnes pratiques expliquant notamment les manières d'utiliser un capteur de CO₂.

Cependant certains lieux ne peuvent pas être aérés facilement, par exemple les salles de cours et de restauration situées en sous-sol. En outre, le bénéfice tiré du renouvellement de l'air intérieur est fortement dépendant de la qualité de l'air extérieur. Lors de pics de pollution, il n'est pas pertinent d'ouvrir grand les fenêtres. Lorsqu'une fenêtre donne sur une « rue canyon », étroite, concentrant les particules fines et les oxydes d'azote, on fera entrer ces polluants extérieurs en voulant renouveler l'air intérieur. Une solution existe cependant, avec les purificateurs d'air, qui assainissent l'air ambiant de ses agents pathogènes et donc potentiellement du SARS-CoV-2.

Différentes technologies de purificateurs d'air existent et sont détaillées dans le rapport. On distingue deux grandes catégories : les dispositifs qui reposent sur un piégeage par filtration et ceux qui utilisent des mécanismes d'oxydation menant à la destruction de l'agent infectieux. Pour les besoins de la lutte contre la Covid-19, et dans le but plus général d'amélioration de la qualité de l'air intérieur, nous recommandons l'utilisation de purificateurs utilisés de filtres à très haute efficacité de filtration, dits HEPA 13 et HEPA 14.

Le rapport souligne qu'il convient de rester très prudent quant à l'utilisation des mécanismes d'oxydation, qui pourraient former des composés nocifs. Rappelons-nous en effet que, comme le disait Lavoisier, rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme. Il faudrait donc s'assurer que les produits de la dégradation ne soient pas nocifs.

Des essais en conditions « réelles » des unités mobiles de purification de l'air doivent être menés. Il ne s'agit pas uniquement de tester un purificateur d'air sur un banc d'essai car il faut garantir que l'efficacité du dispositif est réelle et pas seulement psychologique.

Nous rappelons que l'amélioration de la qualité de l'air intérieur doit en priorité reposer sur l'aération et la ventilation. L'usage de purificateurs d'air ne doit être vu que comme une mesure complémentaire.

Pour finir, je remercie ma collègue Angèle Préville pour son regard toujours rigoureux sur ces questions et l'excellent travail que nous avons pu réaliser ensemble.

M. Gérard Longuet, sénateur, premier vice-président de l'Office.
Merci pour votre rapport, clair et exhaustif, qui prend appui sur l'audition du 4 novembre. Vous n'avez pas cherché à céder aux modes ou aux inquiétudes du moment mais à approfondir le sujet. Cela conduit à un jugement nuancé, notamment sur la question des particules fines, qui ne sont pas forcément des facteurs aggravant la diffusion de la Covid-19. Ce que vous dites sur l'air intérieur relève du bon sens. Encore fallait-il le rappeler. La généralisation des capteurs de CO₂ est souhaitable. C'est une affaire de collectivités locales mais c'est aussi l'affaire de l'Éducation nationale.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. En tant que pédiatre, je savais déjà que les bronchiolites étaient plus fréquentes en ville qu'à la campagne, ce qui est moins le cas pour la grippe. Je reviens de Suède, où personne ne porte de masque et où les taux de contamination par la Covid-19 sont faibles. Comment l'expliquer ? Serait-ce parce que la qualité de l'air y est excellente et que le mode de vie des Suédois les conduit à se rendre souvent à l'extérieur ? Dispose-t-on de comparaisons entre pays européens et entre villes européennes ?

Mme Angèle Prévile, sénatrice, vice-présidente de l'Office, rapporteure. La Suède a une densité de population plus faible que la France. Nous n'avons pas mené d'investigations sur d'autres pays que la France. Il est donc difficile de répondre.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur. Avant d'être parlementaire, j'ai travaillé sur les questions de pollution de l'air d'un point de vue scientifique. On sait que la pollution de l'air extérieur impacte notre système respiratoire. La sphère ORL n'est mature que vers 13 ou 14 ans. L'enfant est fragile avant. Dans mes fonctions professionnelles antérieures, j'ai été amené à travailler en Laponie ; j'ai pu y constater, sur un plan strictement familial, l'effet tout à fait bénéfique de la qualité très élevée de l'air extérieur. La pollution de l'air est un facteur aggravant des problèmes respiratoires. Le rapport souligne que la pollution ne transporte pas forcément le virus, mais que le virus peut plus facilement se développer lorsque notre système immunitaire ou respiratoire est affaibli. Dans les pays du Nord de l'Europe où la densité de population est plus faible et l'activité industrielle plus diffuse, la qualité de l'air est meilleure et les organismes sont certainement plus résistants.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. Je voudrais aller dans le même sens que le président et vous féliciter parce que je trouve que c'est vraiment un rapport tel que nous les attendons à l'OPECST, un rapport fouillé, creusé et qui dépasse le sens commun. C'est un excellent rapport.

Lors de l'audition, j'avais demandé si l'on avait pu établir un lien entre l'installation des purificateurs d'air et le fait qu'il y ait eu plus ou moins d'enfants atteints par la Covid ou de classes fermées dans les écoles concernées du 9^e arrondissement de Paris. Cela n'avait pas été le cas. Est-ce que votre recommandation n° 6 sur les tests d'efficacité vise un suivi pratique de ce genre ? Cela pourrait donner des éléments d'information utiles car même si l'on sait que les enfants peuvent attraper la Covid hors de la classe, peut-être transmettent-ils moins le virus ensuite à l'intérieur de la classe. Est-ce que vous envisagez d'insister sur ce point ?

Par ailleurs, vous avez noté, j'espère, combien l'OPECST a appliqué vos recommandations puisque nous avons ouvert grand les fenêtres de cette salle entre les deux présentations de notes !

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur. J'ai trouvé cela remarquable !

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. Votre présentation montrait clairement que l'ouverture des fenêtres était aussi efficace ou presque que les purificateurs d'air.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur. Pour revenir au sujet des écoles, Angèle Préville et moi avons prévu de nous rendre à la mairie du 9^e arrondissement de Paris la semaine prochaine. Nous irons nous rendre compte sur place et nous faire expliquer sur un cas concret comment l'expérimentation a été menée, avec l'association Respire, qui encadre et qui aide les acteurs à s'organiser sur ces sujets-là.

Je suis d'accord qu'il faudrait parvenir à mieux quantifier les choses. Il existe depuis 2001 un Observatoire de la qualité de l'air, qui est hébergé dans les locaux du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et qui dépend de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), donc du Ministère de la Transition écologique. D'ailleurs, en tant que président du Conseil national de l'air, je me suis toujours demandé pourquoi l'air extérieur est géré par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et l'air intérieur par la DGPR, j'aimerais bien que cela évolue. Il y a des gens remarquables dans cet Observatoire de l'air intérieur, à qui l'on pourrait donner la mission de mettre un cadre, de faire du quantitatif, de suivre des exemples concrets de ce type-là, et de faire ce qu'on appelle en sciences une méthodologie de plan d'expérience, de chimométrie. Cela permettrait d'y voir un peu plus clair.

Je vais vous parler très sincèrement. Il y a quelques mois, je visitais une commune de ma circonscription, une commune plutôt rurale. Le maire m'a dit que la région avait offert un purificateur d'air pour l'école. Je lui ai demandé ce que cet appareil piégeait et ce qu'il purifiait, et comment avait été choisi son emplacement. Il m'a répondu qu'il comprenait mes questions mais qu'il n'avait pas les réponses. J'ai trouvé ça dommage. C'est très bien de financer des purificateurs d'air puisque ça part d'une bonne intention, mais ce serait mieux de le faire selon une méthode suffisamment rigoureuse et de pouvoir expliquer aux parents quel type de purificateur est utilisé et ce qu'il fait. Le message que veut faire passer le rapport, c'est qu'il faut mettre de la rigueur dans tout ça pour ne pas donner l'impression qu'il suffit de « poser quelque part » un purificateur. Au salon des maires, il y a quelques semaines, plusieurs sociétés présentaient des purificateurs d'air et j'ai souhaité me faire expliquer certaines technologies qui avaient l'air intéressantes. J'ai posé des questions sur les composés de dégradation : les avez-vous étudiés ? les avez-vous quantifiés ? comment sont-ils qualifiés ? Il faut des réponses à ces questions. Nous souhaitons donc que soit adoptée une démarche rigoureuse et encadrée. Voilà pourquoi nous pensons à l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur en association avec les associations d'élus et sur la base d'exemples pour aboutir à quelque chose de construit. L'ADEME serait aussi en train de travailler sur ces sujets.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, vice-présidente de l'Office, rapporteure. Les collectivités font des investissements et il est absolument nécessaire que ceux-ci soient efficaces et accompagnés de retours. Le rapport rappelle que, deux ans après le début de l'épidémie et alors que chacun s'en préoccupe beaucoup, la société toute entière doit mieux connaître les questions liées à la propagation du virus et aux dispositifs qui permettraient de l'éviter ou de la freiner en milieu confiné. Cela permettrait de gérer correctement l'installation des capteurs de CO₂ et des purificateurs – en faisant bien la différence entre les deux, ce qui est très important. Chacun devrait savoir exactement quelle est leur fonction et comment il faut gérer l'utilisation au quotidien de ces outils, par exemple dans les salles de classe.

M. Philippe Bolo, député. J'ai été surpris de ne pas entendre parler d'un polluant atmosphérique, les microparticules de plastique, qui ont beaucoup intéressé l'Office il y a quelque mois.

Par ailleurs, pour rebondir sur ce que vous disiez en termes de méthode et de bonne utilisation de l'argent public, on voit fleurir aujourd'hui sur des plateformes de vente en ligne françaises (et pas américaines) des capteurs de CO₂ qui coûtent entre 10 et 40 euros. Pourtant, le rapport indique qu'il faut compter 100 euros pour avoir un capteur de qualité. Ceux qui se trouvent sur Internet ne correspondent-ils à rien de valable ? Est-ce qu'ils ne sont pas fiables ? Quelles sont les bonnes pratiques à faire valoir en la matière ? Le rapport peut donner envie à certains de s'équiper de capteurs de CO₂. Or, n'ayant pas forcément les moyens ou voulant « bien gérer » l'argent public, ils vont aller chercher les capteurs les moins chers. Si ceux-là ne produisent pas de résultats, c'est contre-productif.

J'achève mon propos en vous disant bravo et merci pour ce rapport.

Mme Huguette Tiegna, députée. Je vous adresse moi aussi mes remerciements. Le premier travail de l'Office sur les liens entre Covid-19 et pollution de l'air avait montré que le confinement avait largement contribué à l'amélioration de la qualité de l'air extérieur ; en particulier, la réduction de la circulation avait réduit les émissions de particules fines. Cependant, des évènements extérieurs, notamment des incendies dans certains pays, et les flux atmosphériques ont pu entraîner des pollutions en France. Certains élus s'interrogeaient sur l'utilité des capteurs de CO₂ pour mesurer la qualité de l'air intérieur alors qu'il n'est pas possible de s'assurer de la bonne qualité de l'air extérieur. Pour ceux qui ne possèdent pas de purificateurs d'air et utilisent simplement l'aération, comment s'assurer que la qualité de l'air extérieur est meilleure que celle de l'air intérieur ?

L'utilité de l'aération ne fait aucun doute pour lutter contre la propagation de la grippe ou de la Covid-19. Mais la question n'a pas encore été résolue pour ce qui est des particules fines. Avez-vous connaissance d'équipements qui permettent

de comparer les qualités de l'air intérieur et extérieur ? La recherche doit-elle continuer d'avancer sur ce terrain pour proposer des solutions à nos concitoyens ?

Les mobilités propres pourront aussi améliorer la qualité de l'air extérieur. Pour répondre à la remarque sur le nombre de bronchiolites qui serait plus élevé en ville, j'indique qu'il existe aussi des cas de bronchiolites dans nos territoires ruraux et qu'ils sont souvent liés à l'agriculture et à des phénomènes de pollution comme les incendies.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur. Pendant le premier confinement, on a observé une amélioration assez nette de la qualité de l'air en matière d'oxydes d'azote, leur concentration ayant baissé de 30 à 70% dans les principales agglomérations françaises. La source principale des oxydes d'azote sont les moteurs à énergie fossile.

Il n'y a eu quasiment aucune modification des concentrations en particules fines en mars et avril 2020. C'est normal puisque la source principale des particules fines n'est pas le transport mais le chauffage au bois non performant. En 2019, donc avant l'épidémie, 42% des particules fines PM 2,5 en Ile-de-France venaient du chauffage au bois non performant et 27% venaient des transports. Pour la ville de Paris, les taux sont 38% pour le transport et 35% pour le chauffage. Il en va de même pour l'agglomération lyonnaise. En Ile-de-France, 800 000 foyers utilisent du chauffage au bois dont une partie est non performant. Je ne me positionne pas contre le chauffage au bois mais je souligne le problème du chauffage au bois non performant. Cette problématique a conduit à élaborer le Plan d'action chauffage au bois sur lequel le Conseil national de l'air a travaillé avec le gouvernement et qui a été publié le 23 juillet 2021. J'ai fait adopter certaines mesures législatives par voie d'amendement au projet de loi Climat et Résilience. L'utilisation importante du chauffage au bois pendant le confinement s'expliquait par la présence prolongée au foyer mais aussi par un froid sec plutôt constant.

De plus, au mois d'avril ont lieu les épandages agricoles du printemps. Il ne s'agit pas de montrer du doigt les agriculteurs mais de prendre en compte le fait que la pollution met en jeu divers polluants provenant de diverses sources. Pour les oxydes d'azote, les transports sont la source principale. Pour les particules fines, les sources sont plus diversifiées : les transports, le chauffage au bois non performant, l'industrie, et à certains moments de l'année l'agriculture. La qualité de l'air extérieur s'est donc améliorée pendant le confinement du point de vue des oxydes d'azote mais elle ne s'était pas améliorée du point de vue des particules fines.

Pour ce qui est de la comparaison entre milieu rural et milieu urbain, il est vrai sur un plan statistique que l'air extérieur est de meilleure qualité en milieu rural. Ce n'est cependant pas vrai pendant l'été, car l'ozone est alors le principal polluant. Pour en savoir plus sur les réactions chimiques de l'ozone, je vous

renvoie à mes travaux de recherche et à ma thèse publiée il y a longtemps maintenant.

M. Gérard Longuet, sénateur, premier vice-président de l'Office.
Nous l'avons tous lue !

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, rapporteur.
J'imagine bien, monsieur le président ! J'avais démontré que l'ozone était un polluant des villes et des champs. Nos agriculteurs sont des victimes de la pollution à l'ozone, car les rendements agricoles notamment pour les céréales, peuvent baisser de 15 à 30% à cause de l'ozone d'été. Nous sommes tous responsables et victimes.

En France, la surveillance des concentrations en oxydes d'azote, ozone et particules est quotidienne et règlementée. Jusqu'au 1^{er} janvier 2021, la surveillance de ces dernières ne concernait que les PM 10 ; depuis elle concerne aussi les PM 2,5. C'est un sujet que nous avons porté au Conseil national de l'air et le sénateur Jean-François Husson m'a beaucoup aidé à convaincre le gouvernement de cette extension aux PM 2,5. C'est une décision courageuse car l'intégration des PM 2,5 dans l'indice quotidien entraîne une augmentation du nombre de jours pendant lesquels la qualité de l'air est dite dégradée. Ceci ne veut pas dire que la situation française se dégrade mais que nous sommes plus exigeants. C'est une certaine forme de courage et il ne faut pas hésiter à le dire quand on est dans l'action publique comme nous le sommes. Chaque citoyen et chaque commune peut être informé tous les jours de la qualité de l'air extérieur sur son territoire.

Nous préconisons donc d'installer des capteurs de CO₂ qui indiquent quand l'aération est nécessaire, mais nous préconisons aussi d'être vigilant sur la qualité de l'air extérieur. Lors d'un pic de pollution de l'air extérieur, l'aération conseillée par les capteurs de CO₂ ne sera pas suffisante et l'utilisation de purificateurs d'air est nécessaire. Il faut tenir compte de la qualité de l'air extérieur pour ne pas faire de l'ouverture des locaux un geste systématique qui pourrait faire entrer des polluants qui viendraient endommager le système respiratoire de celles et ceux qui sont dans la pièce. L'une de nos recommandations propose de développer une pédagogie de la transmission du virus en milieu confiné. Au cours d'une audition, nous avons pu voir des graphiques très clairs pour chaque source de pollution en air intérieur. Cette démarche pourrait être mise à profit dans une campagne de sensibilisation, pourquoi pas télévisée, afin d'expliquer ces sujets qui peuvent paraître complexes. Nous pensons qu'il faut s'inscrire dans une telle démarche de pédagogie, qui n'est pas toujours évidente, en direction du grand public. Puisque nous sommes à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, il nous paraît plus que jamais essentiel d'affirmer que la science doit être placée devant les croyances.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. C'est bien vrai.

M. Gérard Longuet, sénateur, premier vice-président de l'Office. Je partage tout à fait ce principe.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, vice-présidente de l'Office, rapporteure. Pour répondre à Philippe Bolo, les microfibres de plastique sont incluses dans le périmètre des « particules », sans distinction. C'est cependant un sujet qui pourrait être approfondi.

La qualité des capteurs de CO₂ varie vraisemblablement avec le prix. Nous estimons qu'un coût d'une centaine d'euros reflète sans doute une certaine qualité, sans que ce soit une garantie absolue. Les capteurs mis sur le marché avec des coûts très faibles ne peuvent très certainement pas être efficaces. Je rejoins Jean-Luc Fugit sur la pédagogie : nous sommes toujours au cœur de l'épidémie, on sent monter un sentiment de lassitude et c'est bien par la science que l'on pourra faire comprendre au grand public comment lutter efficacement contre la propagation du virus. Il est temps de parler un langage de vérité aux Français. Ceci permettra de mieux faire comprendre l'ensemble des mesures contraignantes. Nous espérons aussi que le gouvernement prendra en compte ce que l'on vient de découvrir pour mettre en place des mesures plus fines. La lassitude de la population et les conséquences indirectes de la Covid-19 sur la santé publique doivent être pris en compte dans les mesures que nous serons amenés à mettre en place.

M. Gérard Longuet, sénateur, premier vice-président de l'Office. Je remercie Angèle Prévile et Jean-Luc Fugit de leur implication constante et continue. Le génie est une longue patience, et d'étape en étape nous arrivons à maîtriser ces sujets. Mes chers collègues, je vous propose d'adopter ce rapport et d'en autoriser la publication, complétée par les annexes qui doivent l'enrichir.

L'Office autorise la publication du rapport « Qualité de l'air et Covid-19 : quelles interactions ? ».

LISTE DES PERSONNES ENTENDUES PAR LES RAPPORTEURS

A. AUDITIONS DES RAPPORTEURS

1. Dr Thomas Bourdrel, médecin radiologue et chercheur associé au laboratoire Icube de l'Université de Strasbourg (26 octobre 2021)

2. Université de Genève (04 novembre 2021)

- Pr. Antoine Flahault, Chaire Louis Jeantet de Santé Publique, co-directeur de la *Swiss School of Public Health* (Zürich), directeur de l'Institut de Santé Globale;
- Pr. Markus Stoffel, professeur à l'Institut des sciences de l'environnement ;
- M. Mario Rohrer, collaborateur scientifique, Institut des sciences environnementales.

3. Agence nationale sécurité sanitaire alimentaire nationale (Anses) (16 novembre 2021)

- M. Matteo Redaelli, coordinateur scientifique de l'Unité d'évaluation des risques liés à l'air;
- M. Eric Vial, directeur de l'évaluation des risques.

4. Institut Pasteur (24 novembre 2021)

- M. Jean-Claude Manuguerra, directeur de l'Unité Environnement et Risques Infectieux

5. Predict Services

- M. Alix Roumagnac, président.

B. AUDITION PUBLIQUE « TRANSMISSION DU VIRUS DANS LES ESPACES CONFINÉS, RÔLE DES CAPTEURS DE CO₂ ET DES PURIFICATEURS D'AIR » (4 NOVEMBRE 2021)

- Mme Isabella Annesi-Maesano, directrice de recherche à l'Inserm et professeur d'épidémiologie environnementale ;
- M. Benoît Semin, chercheur CNRS au laboratoire Physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH) et membre du collectif « Projet CO₂ » ;
- M. Fabien Squinazi, médecin biologiste ancien chef du Bureau de la santé environnementale et de l'hygiène à la Mairie de Paris, Vice-

président de la Commission spécialisée risques liés à l'environnement au Haut conseil pour la santé publique ;

- M. Matteo Redaelli, coordinateur scientifique de l'Unité d'évaluation des risques liés à l'air à l'Anses ;
- M. Manuel Rosa-Calatrava, directeur de recherche à l'Inserm et co-directeur du laboratoire de Virologie et Pathologies humaines (VirPath) ;
- M. Tony Renucci, directeur de l'association RESPIRE ;
- M. Thierry Ricci, président et fondateur de Natéosanté ;
- Mme Anaïs Guyomarc'h, directrice des Opérations chez Natéosanté ;
- M. Sébastien Dulermo, 1^{er} adjoint à la Mairie du 9^e arrondissement de Paris en charge de la vie scolaire, de l'alimentation durable, de la végétalisation des bâtiments et de l'espace public et du rayonnement.

ANNEXE :

**COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE SUR « TRANSMISSION DU VIRUS DANS LES ESPACES CONFINÉS, RÔLE DES CAPTEURS DE CO₂ ET DES PURIFICATEURS D'AIR »
(4 novembre 2021)**

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Chers collègues, chers invités, en présence ou en visioconférence, je vous souhaite la bienvenue pour cette audition publique de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) qui porte sur la transmission du coronavirus dans les milieux confinés. Nous parlerons de transmission dans l'atmosphère, de purificateurs d'air, de capteurs de CO₂, ce qui nous conduira à évoquer à la fois des questions d'épidémiologie et de mécanique des fluides.

Notre collègue de l'Assemblée nationale Jean-Luc Fugit et notre collègue du Sénat Angèle Prévaille présideront cette audition. Elle fait suite à un premier travail de Jean-Luc Fugit portant sur les liens entre la pollution de l'air, les gaz à effet de serre et le coronavirus, travail qui a été présenté devant notre Office au printemps 2020. L'audition d'aujourd'hui s'inscrit dans le cadre d'une étude sur les relations entre la pollution de l'air et l'épidémie de Covid-19 engagée sur une saisine conjointe de la commission des affaires sociales et de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Nous sommes donc réunis ce matin pour une audition publique sur la transmission du coronavirus dans les milieux confinés. Nous évoquerons aussi la question des capteurs de CO₂ et les purificateurs d'air.

En mai 2020, l'Office parlementaire a publié une note intitulée *Pollution de l'air, gaz à effet de serre et crise du Covid-19 : quelles interactions ?* Cette note mise en ligne le 15 mai 2020 s'intéressait, deux mois après le début de la crise en France, à l'évolution de la pollution lors du confinement du printemps 2020, au sens des gaz à effet de serre mais aussi des polluants réglementés tels que les oxydes d'azote et les particules fines. Elle s'intéressait d'autre part à la pollution de l'air comme possible facteur aggravant de l'épidémie.

Si différents moyens de mesure avaient permis d'explorer précisément le premier axe, celui de l'effet du confinement sur l'évolution de la pollution de proximité, les études sur le deuxième point n'en étaient encore qu'à leurs débuts ; elles manquaient de données de long terme et de retours d'expérience. Le scientifique que je suis insiste : il faut prendre le temps de comparer, de regarder, d'approfondir, de valider, c'est-à-dire de faire un travail sérieux avant de communiquer et publier un certain nombre d'informations. Au mois de mai 2020, lors de l'examen de la note, l'Office avait décidé qu'une mise à jour serait

nécessaire afin de suivre l'évolution des travaux nationaux et internationaux sur ce sujet de grande importance.

En octobre de cette année, l'Office a été saisi par la commission des affaires sociales et la commission du développement durable de l'Assemblée nationale afin de prolonger cette étude. Il s'agit donc maintenant de faire le point sur les avancées scientifiques puis de tirer des conclusions et des recommandations par rapport aux politiques publiques d'amélioration de la qualité de l'air, conduites et à conduire à la lumière de la crise sanitaire.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, rapporteure. Nous nous intéressons au transport et à la propagation du virus en air extérieur mais aussi en air intérieur. L'aération des pièces et la transmission du virus par aérosols ont longtemps été les angles morts des gestes barrières en France mais ils sont maintenant bien intégrés et ont permis de mettre à jour les conditions d'accueil dans les établissements recevant du public, notamment les écoles.

Ces derniers mois, des questions ont émergé autour de l'utilisation des capteurs de CO₂ et des purificateurs d'air en complément de l'aération régulière des espaces clos. C'est un sujet à part entière qui fait l'objet de débats ; nous avons donc décidé de le traiter à travers l'audition publique de ce matin, qui réunit différents spécialistes et différentes expertises.

Je rappelle que cette audition est publique, diffusée en direct puis en différé sur le site de l'Assemblée nationale. Les internautes ont la possibilité de poser des questions en se connectant à la plateforme dont les coordonnées figurent sur les pages Internet de l'Office. Nous en poserons un certain nombre aux intervenants présents autour de cette table.

Nous commençons par la présentation du professeur Isabella Annesi-Maesano, directrice de recherche à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), responsable de l'équipe Épidémiologie des maladies allergiques et respiratoires (EPAR) à l'Université Paris 6, directrice adjointe de l'Institut Desbrest d'épidémiologie et de santé publique, qui intervient en visioconférence. Le professeur Annesi-Maesano a écrit une tribune dans *Le Monde* en avril 2021, intitulée *Il faut que l'air intérieur soit considéré comme un bien public*. Elle a aussi fait partie des premiers chercheurs à avoir alerté dès 2020 sur les dangers de la contamination par aérosols, surtout en milieu confiné.

Mme Isabella Annesi-Maesano, directrice de recherche à l'Inserm. Je suis effectivement impliquée dans de nombreuses études et je fais partie de sociétés médicales européennes, notamment consacrées à la santé allergique et respiratoire. Sous mon impulsion, la problématique de la contamination par le SARS-CoV-2 et le danger de vivre dans des zones polluées ont été beaucoup approfondis. Considérer à la fois la pollution de l'intérieur et la pollution de l'extérieur, comme vous le faites dans votre étude, me semble une très bonne idée.

Vous avez mentionné la tribune dans laquelle je faisais le point sur l'air intérieur. Cette tribune faisait état de faits moins solides que ce que nous savons

maintenant sur la pollution en air extérieur. Il existe actuellement 1 294 études sur *PubMed* et 52 sur *medRxiv (med-archive)* sur le thème des liens entre pollution et SARS-CoV-2 ou Covid : c'est énorme.

Une méta-analyse a été réalisée et, à la fois pour les effets à court terme et pour les effets à long terme, les risques relatifs sont significatifs. Les études sont éparses et hétérogènes mais leurs résultats sont vraiment concordants. Ces études mettent aussi en évidence un problème majeur, à savoir un gradient selon le niveau socioprofessionnel : les classes sociales les moins favorisées sont les plus exposées, celles où la Covid sévit davantage. La raison en est très simple : la pollution est un irritant et altère la perméabilité des voies aériennes. C'est vrai tant pour la pollution de l'air extérieur que pour celle de l'air intérieur.

Pour les effets à long terme, cette méta-analyse a montré que les organes visés par la pollution de l'air et la Covid sont les mêmes. Des raisons biologiques maintenant bien cernées par les experts étayaient cette hypothèse.

Pour en revenir à la période de confinement, je vous cite ce papier assez ancien qui porte sur le SARS-CoV-1. Il provient d'une très bonne revue, le *New England Journal of Medicine*. Les auteurs concluent, entre autres, que lorsque l'épidémie se propage de personne à personne, à grande échelle et rapidement, il faut envisager, au-delà de la transmission par gouttelettes et par contact, un autre mode de transmission et accorder une grande attention au mécanisme de transmission par aérosols, ce qui a été fait. J'ai signé la première lettre écrite par le professeur Lidia Morawska qui alertait sur le sujet dans le cas du SARS-CoV-2.

Schématiquement, une personne infectée en contact avec un individu peut contaminer ce dernier par les aérosols liés à l'expiration, à la parole ou au chant mais également par évaporation, par les gouttelettes qui sèchent : le virus peut ainsi circuler et contaminer les amis. Bien sûr, ce phénomène est d'autant plus important que l'on se trouve dans un lieu de faible volume.

J'aime bien l'image suivante : il faut penser à la personne infectée comme à une bougie. La cire qui tombe à proximité est constituée de grosses gouttelettes lourdes ; ce sont celles de la contamination directe. La fumée est constituée de gouttelettes légères, qui se dispersent dans l'air et dans l'environnement : ce sont les aérosols, ceux qui s'éloignent.

Voici quelques données qui rappellent des points bien connus maintenant. Une personne infectieuse peut expulser jusqu'à 200 millions de particules virales chaque fois qu'elle tousse, ce qui est énorme. La plupart des gouttelettes sont lourdes et tombent mais certaines entrent en suspension dans l'air pour des durées importantes – jusqu'à sept heures – et elles peuvent se retrouver à plusieurs mètres de la personne qui les a émises.

Tous les environnements fermés avec peu d'échanges d'air et une forte densité de personnes sont idéaux pour la propagation du virus. C'est là qu'il faut vraiment être prudent et, dans les lieux fermés avec un espace suffisant, nous

devons bien sûr rester éloignés de la cire de la bougie. Je trouve que cette notion de distanciation s'est perdue.

L'image présentée maintenant montre un crachat et, en bas à droite, une personne qui émet des aérosols tout simplement en respirant. Mme Lydia Bourouiba avait mesuré ainsi que les aérosols se diffusent jusqu'à huit mètres de distance et restent en suspension dans l'air.

Après ces trois modes de transmission, voyons les répercussions au niveau de l'organisme. Une fois la gouttelette séchée, il reste un petit virus de 0,12 micron, comme celui de la grippe. Ce virus, une fois inhalé, peut franchir la barrière alvéolaire et se retrouver dans le sang – c'est très important – mais aussi bien sûr au niveau de l'épithélium alvéolaire. Un autre point très important et peu connu est qu'une partie de ces particules – en fonction de leur taille – s'arrêtent au nez de par leur mouvement brownien. C'est pourquoi le masque doit couvrir le nez. Les gens ne le savent pas et n'imaginent pas que c'est très important. Des calculs ont été faits et nous savons quelle part de particules ultrafines restent dans le nez.

À titre de démonstration, je vous présente trois cas emblématiques de ce mode de contamination. Le premier concerne une chorale dans le comté de Skagit aux États-Unis. Nous savions déjà qu'il fallait se laver les mains, porter un masque et être éloignés mais, au moment de chanter, les gens enlevaient le masque. Cela se passait dans un local fermé et 50 personnes ont été contaminées. Deux décès ont même eu lieu.

Ce qu'il s'est passé à Wuhan dans un restaurant à plusieurs étages comme il en existe en Chine est encore plus spectaculaire : un individu a contaminé d'autres personnes à plusieurs étages de distance, par le biais d'un système de ventilation mal adapté.

Pour en revenir à la France, l'étude ComCor – un questionnaire très intéressant – de l'Institut Pasteur avait montré que, dans le cas des contaminations extra-domiciliaires, 80 % des contacts avaient lieu à l'intérieur des locaux, fenêtres fermées, et ce en dépit du respect des gestes barrières. Les gens enlèvent le masque pour manger, pour boire, pour prendre un café ou parce qu'il les gêne et, évidemment, c'est problématique.

Pour moi, il faut absolument empêcher la transmission aéroportée du virus. C'est le défi à relever. Il faut compléter les mesures actuelles par des mesures de prévention de la transmission des aérosols à l'intérieur des locaux. Naturellement, il faut ventiler autant que possible. Je sais qu'il fait froid en hiver ou que certains bureaux n'ont pas de fenêtre même si ceci est interdit. Il faut augmenter la distanciation dans les espaces bondés, définir des jauges de fréquentation des locaux. Bien sûr, il faut installer des appareils capables de piéger les aérosols en suspension porteurs de virus ; c'est l'objet de la discussion d'aujourd'hui mais je ne suis pas une experte. Il faut mesurer le CO₂, j'en reparlerai, mais je souhaite d'abord insister sur deux aspects déjà mentionnés.

Premièrement, il ne faut pas confondre ventilation et isolation thermique. Une isolation thermique empêche souvent les échanges d'air si elle n'est pas bien faite.

Deuxièmement, je vous ai déjà parlé du gradient socio-économique dans le risque de contamination. Il faut donc mettre en œuvre en priorité un plan d'assainissement de l'air dans les lieux fréquentés par du public tels que les écoles, universités, lieux de culture, hôtels.

Un appel d'offres Horizon Europe a été lancé. Mes collègues et moi avons soumis un projet concernant notamment les virus – pas seulement le SARS-CoV-2 – à l'école en améliorant la qualité de l'air mais aussi en mettant en place des systèmes d'alerte. Il existe une sonde très intelligente qui permet de détecter le SARS-CoV-2 dans l'air. Le procédé n'est pas complètement validé mais nous pourrions en parler. Dans tous les lieux fréquentés par du public, le dioxyde de carbone peut être utilisé comme indicateur. Je l'avais utilisé lors d'études dans les écoles françaises voici quelque temps.

Nous en arrivons à la priorité générale qui est de réduire les émissions de polluants atmosphériques. Je souhaite vraiment qu'une étude française puisse dire quels sont les liens entre Covid et pollution. Je fais partie du conseil scientifique d'une grande équipe internationale qui a regardé en détail ce que l'on appelle les biais en épidémiologie. Elle a trouvé une relation entre pollution de l'extérieur des locaux, Covid, mortalité et morbidité. J'aimerais qu'une telle étude soit réalisée aussi en France.

Pour finir, j'en viens à ce que j'appelle « le faux sentiment de sécurité ». Il m'arrive de parler avec des gens qui sont sans masque dans le train ou dans l'avion et qui me disent : « De toute façon, je n'en ai pas besoin parce que je suis vacciné. » Nous savons que, malheureusement, les vaccins ne protègent pas complètement. Il existe de nouveaux variants et, chez certains sujets, les vaccins ne fonctionnent pas comme il le faudrait.

Nous avons en interne un service de pneumologie. Nous commençons à revoir des malades, même en réanimation, qui ont eu une double dose. Le vaccin est très important mais il faut que les gens comprennent qu'il est toujours utile de porter le masque. Deux publications récentes ont montré que certains sujets ne sont pas complètement protégés par le vaccin. Il faut aussi savoir que les individus asymptomatiques sont contagieux. C'est pour cette raison que les masques doivent être mis et je conseille vraiment le masque FFP3 dans certaines situations.

Le Japon a enregistré 19 000 décès depuis le début de l'épidémie pour 126 millions d'habitants alors que les Japonais sont âgés ce qui est un facteur de risque de la Covid. Les Japonais disent éviter autant que possible les espaces clos, trop bondés et le contact proche. Je pense qu'il ne faut pas l'oublier.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Je précise aux internautes qui ont déjà déposé un certain nombre de questions que nous écouterons d'abord les intervenants qui sont conviés à cette audition, puis la présentation d'un exemple

concret de mise en œuvre de purificateurs d'air. À la fin de ces présentations, nous poserons un certain nombre de questions des internautes, dans la mesure du temps disponible.

Je passe la parole à M. Benoît Semin, chercheur au Laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et membre du collectif « Projet CO₂ ». Ce collectif préconise l'installation de capteurs de CO₂ dans les établissements recevant du public (ERP) et met en ligne un contenu scientifique, technique et pratique sur l'aération et la mesure du CO₂ comme moyen de lutte contre la propagation de la Covid en milieu clos.

M. Benoît Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». Ma présentation porte sur la mesure du CO₂ : pourquoi mesurer le CO₂ et comment mesurer le CO₂ ?

Quand nous parlons ou respirons, nous émettons non seulement de grosses gouttelettes – les postillons – qui tombent rapidement mais aussi des aérosols, des gouttelettes de taille inférieure à cinq ou dix microns, qui sont invisibles et qui restent en suspension dans l'air. Une très bonne analogie est celle de la fumée de cigarettes : dans une salle où quelqu'un fume, la concentration maximale se trouve à proximité de la personne qui fume mais, même à plus de deux mètres, se trouve une concentration importante en fumée de cigarette si l'espace est mal ventilé. Si quelqu'un inhale ces aérosols, ils se déposent dans les voies respiratoires, du nez jusqu'aux poumons. Ce mécanisme de transmission par aérosols est à la fois à courte portée et à longue distance, à plus de deux mètres dans un même espace clos.

Beaucoup d'arguments justifient cette transmission par aérosols. J'en discuterai quelques-uns. Tout d'abord, du virus viable a été trouvé dans l'air lors de mesures dans des hôpitaux. Ce n'est pas seulement une analogie : le virus a vraiment été détecté dans l'air.

D'autre part, des expériences ont été réalisées avec des animaux, par exemple avec des hamsters, en mettant deux hamsters dans des cages séparées qui partagent le même air. Si l'un des deux hamsters était initialement malade, l'autre devenait malade alors qu'il n'existait pas de contact entre les deux animaux.

Il faut savoir que cette épidémie est dominée par les clusters. Or, les clusters sont un phénomène qui s'explique particulièrement bien par la transmission par aérosols puisque toutes les personnes d'une pièce peuvent respirer le même air et être contaminées. Dans les exemples de la chorale aux États-Unis et du restaurant en Chine, le fait qu'une personne malade et certaines des personnes contaminées aient toujours été distantes de plus de deux mètres a été vérifié, par exemple par vidéosurveillance dans le restaurant chinois. La contamination ne peut pas s'expliquer autrement que par une transmission par aérosols.

Enfin, nous savons par des études avec du traçage de cas contacts en Chine et en Allemagne que le risque de contamination est nettement plus faible à l'extérieur, ce qui montre que cette transmission par aérosols est notable. Ce qui change principalement entre l'intérieur et l'extérieur est que, à l'extérieur, les aérosols sont notablement dilués par l'air.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Quel est l'ordre de grandeur ?

M. Benoît Semin. Les ordres de grandeur donnés sont de dix à douze mais la fiabilité des études reste assez faible.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. La transmission par aérosols serait donc dix fois plus faible en extérieur qu'en intérieur mais ce ne sont pas des chiffres très fiables.

M. Benoît Semin. Oui, même en restant très prudents, nous savons que c'est plus faible, beaucoup plus faible pour la même durée.

De très nombreux articles sur la transmission par aérosols ont été publiés depuis le début de la pandémie dans les principaux journaux scientifiques et médicaux et ils affirment clairement la réalité d'une telle transmission.

Une manière de limiter le risque de transmission par aérosols est la ventilation ou l'aération – ce sont des synonymes – qui consiste à renouveler l'air d'une pièce par apport d'air extérieur ; ceci permet de diluer les aérosols et donc de réduire le risque.

Mesurer les aérosols émis lorsque nous parlons ou respirons est difficile puisque d'autres aérosols sont présents dans la pièce, notamment les particules fines de pollution. Une méthode pour savoir si une pièce est bien ventilée est d'utiliser le fait que, quand nous expirons, nous émettons non seulement des aérosols mais aussi du CO₂. La dilution et le mouvement du CO₂ sont similaires à ceux des aérosols. Plus la concentration en CO₂ est faible, meilleure est la ventilation. La mesure de CO₂ est une mesure de la qualité de la ventilation. Elle présente l'avantage d'être connue et validée dans le domaine du bâtiment et de la qualité de l'air.

Je vous donne quelques valeurs de référence du taux de CO₂. Le taux à l'extérieur est de 0,04 %, ce qui est usuellement noté 400 parties par million (ppm). Dans ses avis, le Haut Conseil de la santé publique a conseillé de ne pas dépasser 800 ppm dans les zones avec masques et 600 ppm dans les zones sans masque comme les restaurants.

Dans les standards pré-Covid donnés par l'Association américaine des professionnels de la ventilation, une bonne ventilation était définie comme une valeur inférieure à 1 000 ppm, ce qui correspond aux valeurs des hygiénistes du XIX^e siècle.

Pour mesurer le CO₂, il faut acheter un capteur de CO₂. Un point de vigilance important est que de très nombreux capteurs ne sont pas fiables. La

technologie de référence est celle appelée infrarouge ou NDIR (*non-dispersive infrared sensor*). La technologie photo-acoustique est prometteuse. Par contre, il faut proscrire les technologies MOX ou électrochimiques. Nous avons constaté que certains capteurs NDIR ne sont malheureusement pas fiables et c'est pourquoi nous proposons sur notre site une liste de capteurs fiables que nous avons testés – à nos yeux, ceci ne crée pas de conflit d'intérêts vis-à-vis des fabricants.

L'utilisation de tels capteurs est relativement aisée. Il faut en étalonner certains en les plaçant à l'extérieur pendant dix minutes et en appuyant sur un bouton. Ces capteurs s'utilisent en présence des occupants. Il faut les placer à la hauteur où nous respirons, entre un et deux mètres de hauteur, et loin des entrées et des sorties d'air, sur une table ou sur un mur.

Ce graphe donne un exemple de mesures issues d'un capteur que nous avons prêté à un collège. Trente personnes sont présentes dans la salle et le taux de CO₂ est initialement de 400 ppm. Au bout d'une heure, le taux est monté à 2 000 ppm puis il atteint 2 500 ppm. Ce qui est intéressant est que, en ouvrant portes et fenêtres, le taux descend très vite et revient à 400 ppm. Ce sont des valeurs qui sont tout à fait similaires à celles des études systématiques réalisées par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, qui relevait que beaucoup d'écoles ont un air très confiné, ce qui signifie avec un fort taux de CO₂. C'est similaire à ce qui est observé dans les autres pays européens.

Nous avons mesuré que, comme le dit la littérature scientifique, la qualité de la ventilation varie beaucoup au sein d'une même catégorie de locaux. Il existe des logements bien ventilés ou mal ventilés, des transports en commun mal ou bien ventilés. Cela montre que les solutions existent – l'ouverture des fenêtres, la ventilation mécanique contrôlée – mais qu'elles ne sont pas mises en œuvre partout.

Pour finir, je parlerai de l'intérêt de la mesure du CO₂ et de la ventilation hors contexte Covid-19. La transmission par aérosols n'est pas propre au SARS-CoV-2. De très nombreuses maladies peuvent se transmettre par aérosols comme la rougeole, la tuberculose, la varicelle, la grippe. Cela montre deux choses. Premièrement, la ventilation peut être utile pour lutter contre les maladies saisonnières telles que la grippe et elle est également un moyen de se protéger et de se préparer en cas d'émergence d'une nouvelle maladie respiratoire qui se transmettrait par aérosols. Deuxièmement, et c'est particulièrement important pour les écoles, les taux de CO₂ élevés diminuent de façon réversible les capacités intellectuelles.

En conclusion, les capteurs de CO₂ permettent de mesurer de façon quantitative la ventilation dans une salle et, lorsqu'il existe des ouvertures comme les fenêtres, ils permettent de sensibiliser les occupants. Ils permettent aussi de déterminer quand il faut ouvrir les fenêtres.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, rapporteure. Je passe maintenant la parole à M. Fabien Squinazi, médecin biologiste, ancien chef du bureau de la santé environnementale et de l'hygiène à la Mairie de Paris, vice-président de la

commission spécialisée « Risques liés à l'environnement » du Haut Conseil de la santé publique.

Depuis le début de la pandémie, le Haut Conseil de la santé publique a rendu plusieurs avis sur la gestion de l'air en milieu confiné et la transmission par aérosols mais aussi sur les capteurs de CO₂ et les purificateurs d'air.

M. Fabien Squinazi, vice-président de la commission spécialisée « Risques liés à l'environnement » du Haut Conseil de la santé publique. Je contribue au Haut Conseil de la santé publique dans une commission sur les risques liés à l'environnement depuis 2013, date à laquelle j'ai quitté le poste de responsable du laboratoire d'hygiène de la Ville de Paris. L'année dernière, au mois de mars, j'ai participé à un groupe de travail du Haut Conseil de la santé publique sur la Covid qui a répondu à de très nombreuses saisines de la Direction générale de la santé et d'autres ministères. Suite à ces avis, nous avons, au mois d'avril de l'année dernière, rendu un avis sur les aérosols en disant qu'il ne fallait pas exclure la transmission par aérosols. Au mois de juillet de l'année dernière, nous écrivions que nous devons envisager la transmission par aérosols, qui était une hypothèse suggérée par toutes les études scientifiques citées précédemment.

Je ne reviendrai pas sur le sujet de la qualité de l'air intérieur, de l'aération et de la ventilation qui vient d'être exposé par mon collègue Benoît Semin, avec qui nous travaillons d'ailleurs dans le « projet CO₂ » pour améliorer le choix des capteurs de CO₂.

Le renouvellement de l'air dans les locaux, qu'il soit réalisé par aération ou par ventilation mécanique, est fondamental car il permet de diluer les aérosols et les polluants intérieurs puis de les extraire. Le contrôle des valeurs de dioxyde de carbone émis par la respiration humaine permet de s'assurer du bon renouvellement de l'air et de l'apport d'air neuf venant de l'extérieur. C'est absolument fondamental.

La notion de purification d'air est apparue en cours de route lorsque nous avons commencé à parler des aérosols, avec en particulier les unités mobiles de filtration d'air. Par « purificateur d'air », on désigne, d'une part, les appareils venant sous forme de boîtes contenant des ventilateurs et permettant de piéger les particules par des systèmes de filtration, d'autre part, les systèmes qui réalisent un traitement physicochimique des différents polluants et détruisent les micro-organismes et les polluants chimiques.

Je distingue les deux parce que le Haut Conseil de la santé publique a mis plutôt en avant les appareils de filtration et a écarté, notamment suite à différents avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), des appareils qui font du traitement physico-chimique et qui peuvent créer des substances chimiques secondaires toxiques, comme l'ozone pour des appareils qui utilisent des champs électriques ou le formaldéhyde pour ceux qui reposent sur la photocatalyse.

Je reviens aux purificateurs d'air, qui sont connus depuis très longtemps. Des appareils pour piéger les aérosols sont apparus l'année dernière. En matière de filtration d'air, il faut différencier trois niveaux. Le premier niveau concerne l'efficacité de la filtration et du filtre utilisé. Elle est mesurée sur des bancs d'essai en laboratoire et le Haut Conseil de la santé publique a recommandé des filtres à très haute efficacité contre les particules aériennes dits HEPA (*high-efficiency particulate air*) et, en particulier, les filtres de catégorie HEPA13 ou HEPA14, qui piègent les particules les plus fines.

Le filtre est installé dans un appareil : il s'agit d'une boîte munie d'un ventilateur et, au deuxième niveau, il est important de tester aussi l'appareil lui-même. Pour cela, depuis déjà de nombreuses années, j'ai contribué à la rédaction d'une norme française, la B44-200, qui permet de tester les purificateurs d'air sur des bancs d'essai pour mesurer leur efficacité. Cette norme aboutit au calcul du débit d'air épuré, en anglais le CADR (*clean air delivery rate*). Le débit d'air épuré permet de qualifier les performances intrinsèques d'un purificateur d'air. Cette notion est fondamentale car elle permet de différencier les appareils en fonction de leurs performances. Il existe des appareils qui ont des petits débits d'air épuré, d'autres qui en ont des plus importants. On a besoin de ces données pour apprécier la performance et l'efficacité de ces appareils.

Le troisième niveau n'est pas toujours abordé. Souvent, on parle uniquement des filtres. Les filtres sont importants, bien sûr, puisqu'ils piègent les particules mais il est aussi important de tester l'appareil lui-même. Le troisième niveau consiste à tester cet appareil en situation réelle car il est difficile de transposer une étude faite en laboratoire, dans une chambre d'essai ou sur banc aéraulique à ce qu'il se passe en situation réelle dans un local, dans une pièce où ont lieu des activités humaines, où se produisent des émissions permanentes d'aérosols. Il peut exister dans cette pièce des obstacles aux flux d'air, une ventilation ou une aération. Plusieurs facteurs interviennent donc sur l'efficacité réelle du purificateur d'air. Il est très important de mener cette étude comme le recommande le Haut Conseil de santé publique, car l'installation d'un purificateur d'air est une véritable intervention technique. Ce n'est pas un appareil que l'on peut placer n'importe où dans une pièce et pour lequel il suffirait d'appuyer sur un bouton pour en purifier l'air.

Un des points très importants à considérer est donc le positionnement de l'appareil dans la pièce. Faut-il le mettre contre un mur ou en plein milieu ? Ce sont des études aérauliques qui permettent de savoir à quel endroit placer cet appareil pour brasser l'air de la pièce. D'autres facteurs interviennent, comme les obstacles au flux d'air ou l'interférence avec la ventilation. Toute une étude technique préalable est nécessaire avant d'installer un purificateur d'air.

Une unité de filtration d'air ne remplace pas la ventilation. Celle-ci a son propre rôle : elle apporte de l'air neuf, de l'oxygène, elle permet de diluer les polluants et elle permet d'extraire ces polluants. L'appareil de filtration d'air quant à lui traite un air pollué, vicié. Il brasse l'air de la pièce mais n'apporte pas d'air

neuf et ne fait pas baisser les niveaux de CO₂. Si c'est une unité de filtration d'air, ce purificateur ne traitera que les particules.

Les particules fines sont souvent d'une taille inférieure au micromètre : en effet, les gouttelettes des aérosols s'évaporent et forment ce qu'on appelle des fines particules ou des résidus secs en suspension dans l'air. Ce sont de très fines particules et, pour que l'appareil soit efficace, il faut qu'il fasse venir, si je puis dire, ces particules jusqu'à lui pour pouvoir les piéger. Or nous n'avons encore que peu d'études qui montrent l'homogénéité de l'efficacité de l'appareil, c'est-à-dire que nous ne savons pas si la concentration de ces particules très fines, porteuses potentiellement du virus qui sera ensuite inhalé, a été réduite partout dans la pièce. Ceci rejoint le troisième niveau dont je parlais précédemment et justifie les études complémentaires que nous essayons de mener actuellement.

Beaucoup d'études sont publiées sur ce sujet mais elles ne permettent pas de mesurer l'homogénéité de la réduction de la contamination particulaire, de savoir quel est le niveau d'exposition à ces particules fines et de savoir si ce sont les particules les plus fines qui ont été traitées. Nous avons besoin de ces informations. La ventilation et le renouvellement de l'air par l'apport d'air neuf restent la mesure principale dans la lutte contre la propagation du virus par les aérosols. Les appareils de purification viennent en complément et ne s'y substituent pas mais il faut mener des études pour quantifier la valeur ajoutée de ces appareils.

Enfin, dans les cas où la ventilation est défaillante, où il est impossible d'ouvrir régulièrement les fenêtres et où l'on souhaite installer un purificateur d'air pour pallier ce défaut de ventilation, il faut savoir que ceci va à l'encontre des textes qui imposent des débits de ventilation réglementaires. Il ne faut jamais oublier que, si la ventilation est défaillante, il faut la remettre en état pour respecter la réglementation, notamment le règlement sanitaire départemental ou le code du travail. Les débits de ventilation réglementaires doivent être respectés. Nous parlions tout à l'heure des écoles mais, souvent, dans d'autres lieux qui reçoivent du public, il n'existe pas de système de ventilation. Ils peuvent avoir un climatiseur pour rafraîchir ou pour réchauffer l'air mais pas de système de ventilation efficace qui permette d'obtenir le résultat attendu.

Je parle évidemment comme représentant du Haut Conseil de la santé publique, qui a publié de très nombreux avis sur le sujet, encore tout récemment, et j'ai donné des explications sur nos avis du mois de juillet dernier. Je parle également de tous les travaux que nous avons pu mener sur la question. La purification de l'air est un sujet sur lequel je travaille depuis de très nombreuses années puisque j'ai été à l'origine de la norme qui teste les purificateurs et mesure leur performance.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Je vous remercie pour cette intervention passionnante. Elle nous a donné des explications qui sont basées sur la science et la technologie et non sur les croyances. C'est ce dont nous avons besoin pour bien comprendre les enjeux.

Nous poursuivons avec M. Matteo Redaelli qui est coordinateur scientifique de l'unité d'évaluation des risques liés à l'air à l'Anses. En 2017, l'Anses a publié un rapport intitulé *Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes* qui passait en revue les différentes techniques de purification de l'air. Plus récemment, à l'été 2021, un axe de recherche « Air et Covid » a été ouvert au sein de l'Anses.

M. Matteo Redaelli, coordinateur scientifique de l'unité d'évaluation des risques liés à l'air à l'Anses. J'espère que ma participation permettra d'apporter quelques éléments constructifs sur la question des épurateurs d'air. Comme vous l'avez signalé, l'agence s'était autosaisie du sujet en 2012. À l'époque, elle n'était évidemment pas motivée par le contexte actuel mais par la multiplication d'équipements qui revendiquaient des propriétés de traitement de l'air. Ces travaux avaient abouti à un avis et à un rapport publiés en 2017.

Il est important de rappeler que nos objectifs, à l'époque, étaient doubles. Il s'agissait d'abord de recenser les techniques d'épuration de l'air disponibles pour le grand public ou en traitement d'appoint en milieu professionnel, donc en écartant les grands systèmes utilisés en conditions industrielles ; il fallait, ensuite, analyser les connaissances sur l'évolution de la qualité de l'air associée à l'utilisation des nouvelles techniques, ce qui n'inclut donc pas les techniques de filtration mécanique, notamment les filtres à haute efficacité déjà cités, qui datent des années 1940 et ont fait leurs preuves en termes d'efficacité et de performance intrinsèque.

Cette analyse s'est, à l'époque, appuyée sur quelque 189 publications scientifiques. Dans la sélection d'articles réalisée, nous avons privilégié les essais en conditions réelles ou en conditions proches de la réalité, pour justement essayer de bien apprécier l'efficacité de ces dispositifs, pas uniquement en conditions expérimentales.

Je rappelle que l'épuration de l'air repose sur deux grands principes. Le premier est de piéger les contaminants, le second est de détruire ces contaminants. Ces techniques d'épuration peuvent être intégrées soit dans des appareils autonomes, soit dans les systèmes de ventilation, chauffage, climatisation d'un bâtiment. Mon propos se centrera plutôt sur le premier point.

En 2017 – cela a pu évoluer depuis –, nous avons recensé 14 technologies d'épuration de l'air sur le marché français. Il s'agissait, par exemple, de l'ionisation, l'adsorption physique, la photocatalyse, la catalyse, le plasma, les rayonnements ultraviolets (UV), l'ozonation. Il est à noter qu'en France, comme ailleurs à l'international excepté dans l'État de Californie, il n'existait pas de réglementation contraignante encadrant ces dispositifs mais, comme cela a déjà été évoqué, il existe des normes sur les performances et l'efficacité intrinsèque en conditions de laboratoire.

Nos travaux ont notamment mis en évidence plusieurs points intéressants. Tout d'abord, il existe peu d'études réalisées en conditions réelles ou proches de la

réalité. Ces études ne permettent pas de démontrer une efficacité significative de ces dispositifs en conditions réelles.

La seconde conclusion est que certains dispositifs peuvent dégrader la qualité de l'air intérieur en générant de nouveaux polluants, notamment l'ozone pour des systèmes tels que l'ozonation, l'ionisation ou le plasma. La formation de particules a également été soulignée, en lien avec l'interaction qui peut se produire entre des terpènes déjà présents et le dispositif. Les terpènes sont des composés organiques volatils qui servent par exemple de désodorisants, que l'on peut retrouver dans l'air intérieur, et leur interaction avec le dispositif peut former des particules secondaires. Il peut aussi se former des polluants cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques tels que le formaldéhyde ou le toluène avec certains autres dispositifs.

Certains traitements utilisent des UV, qui sont un germicide puissant. Ils s'attaquent au matériel génétique des micro-organismes et sont évidemment efficaces pour les détruire. Les seules réserves sur ces traitements sont, d'abord, qu'ils ne puissent pas rayonner directement vers l'être humain puisque nous savons que ceci peut provoquer des érythèmes, des lésions cutanées, des inflammations au niveau de la cornée, des conjonctivites et, ensuite, d'assurer que leur utilisation ne produit pas d'ozone.

À l'inverse de toutes ces technologies qui impliquent un traitement physico-chimique de l'air, la filtration de type HEPA, qui n'avait pas été investiguée à l'époque, n'induit évidemment pas de sous-produit dangereux pour la santé puisqu'elle repose sur une filtration mécanique. Par ailleurs, nous avons plus de recul sur cette technologie qui est déjà ancienne. Elle est notamment utilisée dans les hôpitaux et les laboratoires. Les normes doivent garantir une efficacité de filtration d'au moins 99,95 % des particules de 0,3 micron à partir de tests en conditions de laboratoire. Il s'agit donc de filtres de type H13 ou H14.

Les réserves portant sur les filtres HEPA rejoignent ce qui vient d'être dit par monsieur Squinazi : le rapport entre coût et efficacité en conditions réelles nous semble loin d'être évident, pour quatre raisons. La première est que leur efficacité en conditions réelles n'est pas démontrée. La deuxième est que cela nécessite des réglages, un conditionnement adapté aux conditions de la salle et à la fréquentation. Cela nécessite aussi un entretien régulier des filtres : il ne s'agit donc pas uniquement de poser le matériel et d'appuyer sur un bouton. La troisième raison est que ces appareils peuvent générer un faux sentiment de sécurité. Leur utilisation peut donc entraîner une moindre observance de la ventilation naturelle ou mécanique et du respect des gestes barrières dans le contexte de la pandémie. Le dernier point est que ce filtrage ne permet pas l'apport d'air neuf.

Pour toutes ces raisons, nous considérons que la priorité doit être tournée sans conteste sur l'aération et la ventilation, en complément des gestes barrières et du port du masque *in primis* pour ce qui concerne la pandémie.

Ensuite, je voudrais évoquer un point sur la question des concentrations de CO₂ dans l'air intérieur puisque c'est un sujet sur lequel l'Agence a également

rendu une expertise, en 2013. À l'occasion de cette expertise, nous avons fait une revue des valeurs de concentration en dioxyde de carbone et de leurs effets sur la santé dans les environnements intérieurs, en collaboration avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Il faut rappeler qu'il existe des valeurs limites, réglementaires ou normatives, pour les concentrations de CO₂, qui varient usuellement entre 1 000 ppm et 1 500 ppm suivant les pays, plutôt vers 1 000 ppm en France. Les règlements sanitaires départementaux et le code du travail encadrent ces valeurs.

Nous savons que certains environnements avec un fort taux d'occupation, comme les salles de classe, sont souvent loin du compte au regard du respect de ces normes. Nous savons aussi que les concentrations en CO₂ mesurées dans l'air des écoles ont été associées à des symptômes d'asthme, à une altération des performances cognitives et à de l'inconfort. Une publication de Satish datant de 2012 suggérait également des effets sur les performances psychomotrices – prise de décision ou résolution de problèmes – à partir d'une concentration de 2 000 ppm.

Pour toutes ces raisons, nous considérons que les investissements qui peuvent être consentis pour améliorer le renouvellement de l'air intérieur ne doivent pas être vus qu'au regard du contexte épidémique actuel. Ils sont également susceptibles d'améliorer sur le long terme la santé, le confort et les capacités d'apprentissage de nos enfants. Cela justifie d'investir sur une amélioration de la ventilation dans ces espaces.

Pour conclure sur le thème de la pollution de l'air et du Covid, nous avons publié une note d'appui scientifique et technique en juillet dernier. Cette note avait d'abord pour objectif de récapituler l'état des connaissances sur la transmission par aérosols, qui a déjà été largement évoquée par les précédents interlocuteurs. L'objectif était également d'étudier la viabilité dans l'air du virus et les questions de dose infectante qui restent encore très complexes. Nous avons analysé à cette occasion quelque 400 publications scientifiques.

La note confirme qu'il existe un fort faisceau d'arguments en faveur d'une transmission par aérosols. Nous parlons toujours de faisceau d'arguments et non de preuve pour la simple et bonne raison que, aujourd'hui, il n'existe pas d'étude expérimentale chez l'homme permettant de prouver la transmission par aérosols et que des études épidémiologiques ne permettent pas de prouver une transmission par aérosols, même si beaucoup de travaux épidémiologiques déjà évoqués montrent un risque augmenté dans les environnements intérieurs mal ventilés.

Nous n'avons toujours pas de réponse quant aux parts respectives des différentes voies de transmission dans le risque d'infection. Très honnêtement, c'est une question à laquelle il risque d'être très difficile, voire impossible, de répondre puisqu'elle s'est déjà posée pour la grippe et qu'elle reste sans réponse. Pour autant, les nombreuses publications scientifiques sur le sujet au cours de ces deux années d'épidémie montrent de façon certaine que le risque de transmission

est augmenté dans les environnements intérieurs fortement fréquentés, confinés ou mal ventilés. C'est un point sur lequel nous avons une forme de certitude.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, rapporteure. Je vous remercie. Je passe maintenant la parole à M. Manuel Rosa-Calatrava, directeur de recherche à l'Inserm et codirecteur du laboratoire de virologie et pathologie humaine (VirPath) qui interviendra en visioconférence. Le laboratoire VirPath, en partenariat avec la société VirHealth, a rendu en mars 2021 les conclusions d'une étude qui consistait à tester l'efficacité de deux purificateurs d'air contre le SARS-CoV-2, notamment les filtres HEPA.

M. Manuel Rosa-Calatrava, directeur de recherche à l'Inserm, codirecteur du laboratoire de virologie et pathologie humaine (VirPath). Je suis virologue de formation. Le savoir-faire du laboratoire VirPath à Lyon consiste en l'étude, la manipulation, la production et la quantification des virus respiratoires infectieux tels que les virus influenza, les pneumovirus notamment responsables des bronchiolites des jeunes enfants et le SARS-CoV-2 depuis janvier 2020. Nous avons une activité très soutenue, tant sur le volet des antiviraux que sur le volet des vaccins. Un troisième axe nous implique fortement dans la lutte contre le SARS-CoV-2 depuis deux ans et s'inscrit dans notre démarche de contribuer à un meilleur contrôle des pathogènes viraux respiratoires : il s'agit de l'évaluation des dispositifs et technologies d'épuration de l'air.

Je suis en complet accord avec les interlocuteurs précédents mais j'ai quand même plusieurs commentaires et précisions à apporter. Le premier est que la pandémie à SARS-CoV-2 a, je crois, permis de prendre véritablement conscience de l'importance de l'enjeu sanitaire, économique et sociétal de la qualité de l'air intérieur. Finalement, le SARS-CoV-2 et d'autres virus respiratoires tels que les virus influenza ou les virus responsables des bronchiolites sont des pathogènes qui se transmettent par aérosols comme cela a été prouvé par différentes études précliniques avec des modèles animaux, mais également par contact de surface.

Je donne quelques chiffres pour replacer dans son contexte la lutte actuelle contre le SARS-CoV-2 mais aussi, en termes d'investissement d'avenir, contre des épidémies saisonnières. Les virus influenza responsables de la grippe provoquent entre 5 000 et 15 000 morts par an en France et plus de quatre millions de journées de travail perdues, alors qu'il existe plusieurs vaccins disponibles sur le marché et plusieurs antiviraux. Pour les pneumovirus responsables notamment des bronchiolites mais aussi de pneumopathies sévères chez les personnes âgées, il n'existe sur le marché ni vaccin ni antiviral. C'est un vrai problème et, actuellement, avec le déficit de l'immunité collective vis-à-vis des virus type virus respiratoire syncytial (VRS) et métagpneumovirus, une problématique sanitaire supplémentaire s'ajoute à la pandémie à SARS-CoV-2.

Dans ce contexte, nous avons mené un certain nombre d'études et d'essais pour évaluer les purificateurs d'air filtrants, notamment sur la base des

recommandations du Haut Conseil de la santé publique comme l'a rappelé monsieur Squinazi, et à la demande de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Nous avons mobilisé un banc d'essai de 2,5 mètres cubes, dans lequel nous sommes capables de générer des atmosphères très hautement contaminées par des virus respiratoires – en l'occurrence le virus SARS-CoV-2 – pour caractériser selon un protocole scientifique, avec tous les contrôles nécessaires, les performances des purificateurs d'air filtrants. Nous avons notamment étudié l'abattement de particules virales infectieuses et la stabilité du SARS-CoV-2 sur les filtres HEPA.

L'objectif n'était bien évidemment pas de prouver l'efficacité des filtres HEPA H13 ou H14. Ce sont des dispositifs que nous avons dans nos laboratoires, notamment dans notre laboratoire BSL-3 (*biosafety level 3*) ou P3 (pathogènes de classe 3) au niveau de l'air entrant et de l'air sortant. L'objectif était d'évaluer un dispositif dans son entièreté, selon son mode de fonctionnement, le débit d'air et la durée de fonctionnement.

Nous sommes conscients des limites de nos technologies et de nos savoir-faire. Le premier point important à retenir est que, pour évaluer ces technologies, la mesure fondamentale en ce qui concerne les virus respiratoires est le nombre de particules infectieuses et non la détection de génomes viraux. Ceci nécessite un savoir-faire en termes de production en grands volumes de ces virus respiratoires, de génération d'atmosphères très hautement contaminées par nébulisation et de récolte en préservant le mieux possible les virus infectieux résiduels après fonctionnement de ces épurateurs, de façon à pouvoir quantifier ces particules virales infectieuses et mesurer l'abattement viral.

Pour évaluer ces dispositifs *in situ*, nous n'allons certainement pas nébuliser du virus infectieux dans une salle de classe ou dans un établissement recevant du public (ERP). L'enjeu est de disposer d'un banc d'essai de très grand volume mimant le mieux possible les conditions environnementales *in situ*, c'est-à-dire avec des approches d'aéraulique, de génération de flux d'air anarchiques comme dans une salle de classe ou maîtrisés, contrôlés comme par exemple dans une salle propre, de pouvoir modéliser cette aéraulique, de faire varier des paramètres environnementaux comme la température et l'hygrométrie, et de générer des atmosphères très hautement contaminées par des virus infectieux dans de grands volumes.

Notre ambition est de proposer un protocole de déploiement *in situ* de ces dispositifs, ce que nous ne sommes pas capables de faire aujourd'hui. Je parle du nombre de ces dispositifs, de leur mode de fonctionnement selon leurs caractéristiques de débit d'air, et de leur disposition dans ces environnements. Nous nous sommes fixé cet objectif avec plusieurs acteurs du domaine et nous espérons bien pouvoir l'atteindre parce que le besoin est énorme. Il a été exprimé par les interlocuteurs précédents, par les institutions et par les industriels. Il faut pouvoir évaluer les performances de toutes ces technologies dans les conditions les plus proches de la réalité.

L'autre problème auquel nous sommes confrontés aujourd'hui est l'absence de normes françaises, et même mondiales, par rapport à la décontamination de l'air sur un plan virologique. Ce problème s'explique assez facilement parce que manipuler, produire, quantifier des virus infectieux nécessite des savoir-faire, des technologies, des espaces de laboratoire dédiés et qualifiés au niveau BSL-2 ou BSL-3.

Nous avons intégré plusieurs groupes de travail de l'Association française de normalisation (AFNOR) pour essayer de compléter la norme B44-200 que M. Squinazi a contribué à mettre en place par un volet virologie. Comme l'Anses et le Haut Conseil de la santé publique l'ont recommandé, nous intégrons l'évaluation de ces dispositifs selon une norme qui mime le plus fidèlement possible la réalité des environnements avec ces données d'aérodynamique, de paramètres environnementaux et toute la biologie associée au virus.

En effet, la contamination par aérosols est possible mais ces aérosols sont très hétérogènes en termes de taille de particules et de composition. Ils sont constitués de mucus, de salive et tout l'enjeu de notre travail au laboratoire est de mimer au mieux les conditions environnementales *in situ* pour être capables de caractériser du mieux possible les performances des dispositifs purificateurs d'air filtrants mais également des autres technologies comme les UV-C (bande 100-280 nm des ultraviolets), l'ozone, la photocatalyse. Il s'agit de proposer des protocoles de déploiement *in situ* de ces dispositifs.

Pour vous faire saisir la difficulté technologique et les besoins logistiques et matériels pour évaluer ces dispositifs en atmosphère très hautement contaminée, je vais vous présenter une vidéo d'une minute environ.

Une courte vidéo présente le banc d'essai aux membres de l'Office (culture du virus, nébulisation des virus dans le banc, récupération et quantification des virus après test).

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Est-il si important de faire ces tests expérimentaux avec de « vrais virus », si je puis dire ? Ne serait-il pas possible d'utiliser des modèles chimiques ayant des caractéristiques similaires ? Pour le formuler autrement, parmi les processus de filtration que vous souhaitez calibrer, lesquels utilisent le fait qu'il s'agit vraiment d'un virus et lesquels utilisent juste le fait qu'il s'agit d'une particule de 0,1 micron, pour laquelle ce sont les aspects chimiques et physiques qui comptent et non les aspects biologiques ?

M. Manuel Rosa-Calatrava. En tant que virologue, je peux vous répondre qu'il est essentiel d'évaluer ces dispositifs et ces technologies avec de véritables virus infectieux. Comme je le disais au début de mon exposé, il faut bien faire la différence entre des particules virales infectieuses d'une taille donnée et des particules virales non infectieuses, en l'occurrence la quantification des génomes viraux. Ce n'est pas parce que nous détectons ou quantifions du génome viral dans une chambre d'hôpital ou dans une salle de classe que des virus infectieux sont encore présents, et inversement.

Le deuxième point est que les microgouttelettes sont très hétérogènes en termes de taille mais également en termes de composition. Ce sont des mélanges physiologiques très complexes, avec du mucus, de la salive, des quantités très variables de particules virales infectieuses effectives. Je pense qu'une évaluation dans des conditions environnementales les plus proches possible de la réalité sur du vrai virus infectieux et avec un protocole expérimental dédié, robuste comportant les contrôles nécessaires permet d'évaluer de manière pertinente les performances de ces technologies en termes d'abattement viral. Surtout, en intégrant la dimension aéraulique du sujet, cela rend capable de proposer un protocole de déploiement de ces dispositifs *in situ*.

Bien évidemment, évaluer ces dispositifs dans des grands volumes ou dans des pièces comme des salles de classe, sur des particules physiques avec des notions d'aéraulique, est très important parce que ceci permet d'avoir des données très précises sur les performances en termes de débit d'air et de renouvellement de l'air. Mais il n'en reste pas moins qu'une évaluation avec des vrais virus infectieux est essentielle.

De plus, cela permet de connaître le temps de stabilité des virus infectieux sur les filtres, ce qui est très important, notamment pour les personnels qualifiés qui devront les changer de manière régulière et surtout pour les personnels non qualifiés. Imaginez dans l'Education nationale : comment savoir qui changera ces filtres, à quelle fréquence et avec quel risque, si nous n'avons pas préalablement évalué la durée de stabilité des virus infectieux sur les filtres ?

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. La première étape du processus d'évaluation d'un filtre consiste donc à vérifier son efficacité vis-à-vis de paramètres chimiques. La deuxième étape est un travail fin et réaliste avec le vrai virus pour savoir comment le potentiel de contamination est abaissé et quelles sont les précautions à prendre par rapport au filtre usagé.

M. Manuel Rosa-Calatrava. C'est tout à fait cela et j'ajoute la nécessité de bien évaluer un dispositif dans son entièreté. La question ne porte pas uniquement sur le filtre HEPA H14 ou H13 mais sur le dispositif tout entier, dans ses réelles capacités de débit d'air, de renouvellement d'air, d'aspiration et d'étanchéité. C'est pour cela que la mise en œuvre de tels protocoles dans des bancs d'essai de très grands volumes est à mon sens nécessaire pour évaluer les performances de tels dispositifs.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Les termes HEPA H13 ou H14 font-ils référence à des technologies particulières ou à des performances en termes de pouvoir filtrant ?

M. Manuel Rosa-Calatrava. Monsieur Squinazi pourra répondre de manière plus complète mais ce sont avant tout des qualifications relatives aux matériaux et à la capacité filtrante.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Nous y reviendrons. Il s'agit de capacités de filtration, en lien avec la taille des particules.

Nous passons maintenant à un exemple encore plus concret avec la présentation conjointe de l'expérimentation menée dans le 9^e arrondissement de Paris par l'installation de purificateurs d'air dans deux écoles, en février et avril dernier. Vont intervenir M. Tony Renucci, directeur de l'association Respire, M. Thierry Ricci, président et fondateur de Natéosanté, et M. Sébastien Dulermo, premier adjoint à la mairie du 9^e arrondissement de Paris, chargé entre autres de la vie scolaire, de l'alimentation durable et de la végétalisation des bâtiments.

M. Sébastien Dulermo, premier adjoint à la mairie du 9^e arrondissement de Paris. Pour commencer cette présentation collective, je vais poser le contexte et la chronologie qui nous ont amené à installer ces purificateurs.

Tout a commencé bien avant la crise sanitaire puisque nous avons commencé à réfléchir à ce système d'équipement en 2017, lors de la Journée nationale de la qualité de l'air, créée en 2015. Lors de cette journée, la maire d'arrondissement et quelques membres de son équipe ont écouté une interview sur la qualité de l'air dans les classes. Nous avons alors vu que des questions se posaient sur l'absence de ventilation mécanique contrôlée (VMC) dans ces bâtiments publics, le nombre d'élèves au mètre carré et leur temps de séjour dans ces classes, l'utilisation de solvants, l'utilisation de feutres qui sont ouverts et fermés par les élèves, etc. et donc la présence d'un grand nombre de polluants dans l'air intérieur. La maire d'arrondissement est ensuite intervenue sur le sujet devant le Conseil de Paris mais la réponse de l'exécutif n'était pas vraiment satisfaisante puisqu'il ne mettait pas en place un plan global ou une étude à l'échelle de la ville.

En janvier 2018, la loi « Grenelle II » a rendu obligatoire la surveillance de la qualité de l'air dans certains établissements recevant du public et plus particulièrement dans les écoles maternelles et élémentaires, justement là où la question s'était posée au niveau de l'ensemble de la ville. Encore une fois, nous n'avons pas eu de réponse et nous avons réfléchi à une action locale, sur le terrain.

En juin 2018, l'étude Écol'air de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) préconisait d'aérer le plus possible ces lieux confinés et, en l'absence de système de ventilation mécanisé, elle préconisait l'installation de capteurs et de purificateurs. En 2018, donc bien avant la crise sanitaire, nous avons équipé l'ensemble des 150 classes de l'arrondissement avec des capteurs de CO₂.

En 2019 est parue l'étude de l'association Respire qui parlait de la qualité de l'air extérieur aux abords des écoles, avec un tableau assez noir pour les écoles parisiennes et notamment certaines écoles du 9^e arrondissement qui sont dans un milieu assez pollué. Nous avons alors souhaité aller plus loin que les capteurs de CO₂ et, avec Natéosanté, nous avons installé, dans chaque classe, deux appareils purificateurs d'air, soit 300 appareils dans les 150 classes de l'arrondissement.

C'est ainsi que l'aventure a commencé, bien avant la crise sanitaire et vous connaissez la suite. Nous voilà donc aujourd'hui devant vous pour vous présenter cette expérimentation et cette évaluation.

M. Tony Renucci, directeur de l'association Respire. Monsieur le président, mesdames et messieurs les députés, mesdames et messieurs les sénateurs, je vous remercie de nous recevoir pour cette audition aujourd'hui et, surtout, je salue le fait que ce sujet de la pollution de l'air intérieur soit étudié par la représentation nationale.

Avant de vous présenter synthétiquement les enseignements de l'étude, je voudrais faire un petit rappel sur l'association Respire dont j'ai pris récemment la direction générale. Nous sommes la principale association de lutte contre la pollution de l'air. Notre philosophie est de nous appuyer sur les données scientifiques pour informer, communiquer et sensibiliser sur les enjeux de la pollution de l'air.

C'est à ce titre que la mairie du 9^e arrondissement a fait appel à nous pour l'accompagner dans une démarche d'expérimentation et étudier l'action conjointe des purificateurs et capteurs de CO₂ dans les écoles.

En effet, la qualité de l'air est préoccupante dans un grand nombre d'établissements parisiens. Nous avons publié en 2019 une étude réalisée sur les données de 2018 d'après laquelle la pollution dépasse les normes légales aux alentours de 467 établissements en Île-de-France dont 350 à Paris, avec des conséquences connues. Les enfants sont plus vulnérables car leur système respiratoire immunitaire n'est pas encore arrivé à maturité. Ils sont donc plus soumis aux crises d'asthme et à un retard de développement, et leurs capacités scolaires sont également amoindries.

Deux solutions sont possibles : soit diminuer la pollution extérieure aux abords des établissements mais, même si nous progressons, c'est encore trop lent ; soit agir sur la qualité de l'air intérieur. Une expérimentation portant sur ce deuxième levier était donc intéressante.

Nous avons réalisé une campagne expérimentale en situation réelle entre février et avril 2021 dans deux classes de maternelle. Nous avons installé deux purificateurs d'air et des capteurs de pollution de la marque Natéosanté dans chaque classe. Des mesures de concentration de particules fines de diamètre inférieur à 2,5 microns (PM 2,5) ont été réalisées dans chaque classe pendant une semaine, avec et sans épurateur d'air.

Durant la première semaine, la classe A n'a pas d'épurateur d'air et, dans la classe B, un épurateur d'air est allumé sur le niveau 1. Durant la deuxième semaine, un épurateur d'air est allumé sur le niveau 1 dans la classe A et la classe B n'a pas d'épurateur d'air. Bien sûr, des capteurs de CO₂ étaient installés. Je rappelle que la concentration en CO₂ augmente lorsque l'air n'est pas suffisamment renouvelé, avec comme conséquences possibles une perte d'attention, voire de la somnolence. Ce sont des capteurs de la marque Pyrescom

qui ont été installés dans les salles de classe, près de l'entrée. Lorsque la concentration en CO₂ devient élevée, un voyant passe du vert à l'orange puis au rouge, signalant qu'il faut aérer.

Le graphe montre que le taux de CO₂ dépasse largement le seuil recommandé de 1 000 parties par million ; il monte même parfois à 3 000 parties par million. Le niveau de CO₂ augmente rapidement dès que les enfants arrivent dans la classe et il chute plus rapidement encore lorsque les salles sont aérées. Les moments d'aération correspondent bien sûr aux moments de pause comme le montrent les différentes infobulles qui ont été placées sur le graphique.

M. Thierry Ricci, président et fondateur de Natéosanté. Je me réjouis d'être parmi vous pour partager ce retour d'expérience qui, lorsque nous l'avons mise en place, était innovant puisque nous accompagnions la mairie du 9^e arrondissement dans une démarche à l'époque exemplaire.

Je suis un convaincu de la purification de l'air par filtration et j'ai créé la société Natéosanté voici douze ans parce que j'étais moi-même allergique et souffrant de nombreux symptômes respiratoires. J'ai fait porter mes efforts sur la fabrication, en France, de produits de haute efficacité. Aujourd'hui, notre technologie et notre savoir-faire commencent à être clairement identifiés puisque nous exportons dans 50 pays. Ces deux dernières années, nous avons équipé en France des centres médicaux, des hôpitaux mais aussi de nombreuses écoles et des espaces tertiaires.

Nous nous sommes toujours appuyés sur la technologie HEPA et nous avons toujours été très transparents sur les performances. Nous connaissons plutôt bien la norme de Monsieur Squinazi puisque nous l'avons mise en application. Notre intérêt est également de démontrer l'efficacité d'ensemble de nos dispositifs, sans s'appuyer uniquement sur la norme des filtrages HEPA H13 ou H14. Il faut vérifier aussi l'étanchéité globale du système.

Nous sommes aussi très attachés à l'innocuité qui résulte de l'écoconception. Nous avons été deux fois lauréats de l'ADEME et, surtout, nous avons été accompagnés par le programme ETV (*Environmental technology verification*) qui est le programme de la Commission européenne pour les écotecnologies innovantes, particulièrement la validation des performances et de l'innocuité.

Notre société accompagne les professionnels sur des enjeux forts de santé, notamment ceux que nous appelons aujourd'hui les « professionnels exigeants ». Nous nous sommes renforcés ces deux dernières années sur cette mission.

Lorsque nous avons intégré le parcours de qualification pour la mairie du 9^e arrondissement, le cahier des charges était plutôt technique, puisque le premier souhait était d'avoir un niveau acoustique très faible, l'objectif étant de ne pas perturber l'environnement de travail de la classe. Comme cela a été précisé tout à l'heure, deux dispositifs étaient placés dans chaque salle de classe et ces dispositifs devaient forcément être petits et d'installation facile. Il fallait qu'une

prise électrique suffisante à l'alimenter. Les autres critères étaient une filtration par filtre HEPA, une faible consommation d'énergie et une maintenance sans contrainte, sans outil, pour qu'il soit facile de procéder au changement des filtres de manière assez régulière.

L'exercice a porté essentiellement sur les particules PM 2,5 ce qui peut sembler à la fin de l'année 2021 un peu en décalage avec ce dont nous parlons aujourd'hui, qui concerne plutôt des particules entre 0,3 et 0,1 micron. De notre côté, nous avons continué à avancer sur cette technique mais il faut comprendre que le sujet de la qualité de l'air accélère très fortement depuis le printemps 2020.

Mme Anaïs Guyomarc'h, directrice des opérations et directrice recherche et développement de Natéosanté. Nous avons en effet accompagné la mairie du 9^e arrondissement sur un protocole destiné à évaluer l'efficacité des purificateurs d'air en condition réelle dans les salles de classe.

Le graphique visible à l'écran présente la concentration en particules fines sur une semaine. Nous avons choisi de faire l'étude sur une semaine pour limiter les désagréments pour les enseignants, notamment pour ne pas avoir à allumer et éteindre les purificateurs, à bouger les capteurs, etc. Nous avons mis au point un protocole qui était simple pour les usagers.

Nous voyons en rouge l'exemple de la semaine 2 sans épurateur d'air et en noir avec épurateur d'air. Que ce soit durant les périodes de calme, la nuit, ou au moment des pics, la concentration en particules fines sans épurateur d'air est plus élevée qu'avec l'épurateur. Les pics correspondent aux périodes d'aération, de récréation, d'ouverture des fenêtres ; ils étaient assez bien corrélés avec la mesure de CO₂ réalisée en parallèle. Ces pics peuvent être dus à plusieurs phénomènes, à la fois à l'agitation des élèves pour se ruer vers la cour de récréation qui provoque un déplacement des particules mais également à l'entrée des particules atmosphériques venant de l'extérieur.

En moyenne, durant la semaine 1, nous avons constaté une amélioration de 19 % du nombre mesuré de particules par mètre cube et, durant la semaine 2, une amélioration de 29 %. Pour les concentrations maximales, l'amélioration était de 18 % durant la première semaine et jusqu'à 53 % la deuxième semaine.

Il faut prendre en compte le fait que les deux classes n'avaient pas le même positionnement dans l'école. Pendant la semaine 1, la salle avec épurateur se trouvait côté rue et la salle sans purificateur côté cour. Le niveau de particules, en ligne de base, était forcément plus important côté rue mais nous avons malgré tout obtenu une amélioration avec le purificateur. Il est plus significatif en semaine 2 puisque c'était la salle de classe côté cour qui était équipée.

Nous avons choisi de mesurer les PM 2,5 qui sont caractéristiques de la pollution atmosphérique puisque c'était le sujet à l'époque. M. Dulermo reviendra sur le retour d'expérience côté mairie mais nous avons la chance aujourd'hui de travailler aussi avec le professeur Squinazi car au sein de la Fédération interprofessionnelle des métiers de l'environnement atmosphérique (FIMEA),

nous sommes convaincus qu'il faut améliorer les protocoles d'évaluation en conditions réelles.

Des études relatives aux particules de 0,3 micron dans des écoles situées en Allemagne sont récemment sorties et ont montré une décroissance significative en présence d'unités mobiles à filtre HEPA. Une étude dans un hôpital à Cambridge, en prépublication dans *Nature*, a montré que l'utilisation dans un service Covid d'unités de traitement HEPA et UV-C permettait de ne plus mesurer de SARS-CoV-2 dans l'air. Des études démontrent donc l'intérêt d'utiliser de tels dispositifs.

M. Sébastien Dulermo. Le retour d'expérience porte notamment sur l'installation de ce matériel. Nous avons eu au départ beaucoup de questions sur les capteurs : le personnel enseignant voyait arriver cet objet d'un œil un petit peu intrigué ; des enfants questionnaient les instituteurs et les institutrices sur le voyant qui passait du vert à l'orange puis de l'orange au rouge. Nous avons dû faire de la pédagogie au niveau des enfants et au niveau du personnel en expliquant que, dès que le voyant passait à l'orange, il fallait ouvrir les fenêtres. Cela ressemblait à une alerte à la bombe au début mais, finalement, tout s'est bien passé.

Pour installer les purificateurs – ce sont des questions pratico-pratiques mais elles sont très importantes – les classes doivent être équipées de prises électriques. Bien sûr, il en existe mais elles sont en général toutes utilisées et il fallait donc trouver des prises disponibles. Comme nous mettions deux purificateurs par classe, il fallait que ces purificateurs ne soient pas situés dans la même zone, plutôt un en fond de classe et un vers le tableau. Il fallait aussi qu'ils restent allumés en permanence, sachant que la mairie n'a pas de lien hiérarchique avec le personnel de l'Éducation nationale. Comme c'était une volonté politique de notre part, il fallait aussi que la volonté soit partagée par le personnel de l'Éducation nationale.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. L'Éducation nationale a-t-elle fait un commentaire ?

M. Sébastien Dulermo. Malheureusement non – ou heureusement, je ne sais pas... En tout cas, elle nous a laissés faire, sans donner d'instruction à son personnel. Si celui-ci ne s'était pas inscrit dans la démarche, nous aurions pu nous voir opposer un refus et les purificateurs n'auraient pas été installés. En fait, le personnel était vraiment très motivé.

Le début a été la phase la plus compliquée pour nous. Avec la crise sanitaire, la situation s'est dégagée puisque, finalement, tout le monde a bien voulu les installer dans les classes et dans chacune des pièces de l'école. Toutefois, au début, alors que personne n'avait installé ces purificateurs dans aucune classe, que la Ville de Paris ne nous suivait pas et que l'Éducation nationale ne nous donnait pas raison, nous étions précurseurs et ce n'était pas toujours évident. Mais nous y sommes arrivés.

La question du coût se pose aussi ; c'est un réel investissement. Nous avons installé, dans le 9^e arrondissement, 150 capteurs de CO₂ à 300 euros pièce soit un total de 45 000 euros. Quand nous avons voulu installer les purificateurs avec Natéosanté, comme nous étions précurseurs, tout le monde a fait des efforts – nous les en remercions au passage. Ils ont coûté au total 28 400 euros pour les 150 classes de l'arrondissement.

À la rentrée 2021, nous avons souhaité poursuivre cet effort en installant des purificateurs dans les crèches du 9^e arrondissement. Depuis la rentrée 2021, toutes les crèches sont équipées mais les purificateurs ne sont pas au même prix. Ceux qui équipent les écoles coutaient environ 95 euros pièce mais, dans les crèches, nous avons payé les appareils 250 euros pièce. Nous avons aussi installé des purificateurs de plus grosse capacité dans les réfectoires. Ainsi, les crèches, les cantines et tous les établissements scolaires publics de l'arrondissement sont équipés.

Nous souhaiterions maintenant aller plus loin en équipant tous les locaux sportifs puisque ce sont des établissements confinés avec peu d'aération naturelle, mais le budget d'une mairie d'arrondissement ou d'une mairie de plein exercice est limité. C'est un réel effort financier, qui suppose une réelle volonté politique. Si nous sommes présents aujourd'hui, c'est aussi pour le dire et pour proposer de réfléchir à un plan national. La maire d'arrondissement, Delphine Bürkli, a écrit à Bruno Le Maire, ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance, le 10 mars dernier pour lui suggérer qu'un effort soit fait sur ce sujet dans le Plan de relance, avec les filières françaises avec lesquelles nous travaillons. Il est possible d'agir pour équiper l'ensemble de nos lieux publics. Je vous remercie en tout cas de nous avoir reçus aujourd'hui.

Mme Angèle Prévile, sénatrice, rapporteure. Je vous remercie beaucoup pour ces interventions très intéressantes et très riches dont nous ferons notre miel pour la rédaction de notre rapport.

J'étais professeur moi-même avant d'être parlementaire et il serait très intéressant que, si possible, des documents très concrets soient envoyés aux professeurs, sur le rythme souhaitable des aérations et sur les temps d'aération, en hiver ou en été.

Puisque nous avons parlé de la taille des particules, les purificateurs d'air sont-ils bien adaptés à la filtration des particules ultrafines, c'est-à-dire de taille inférieure à 0,1 micron ? Nous avons également parlé des cantines scolaires ; est-il vraiment envisageable de généraliser une installation telle que celle que vous avez mise en place, considérant les volumes d'air expirés et l'important volume de ces locaux ? J'ai bien pris note du coût des installations et de l'effort financier qu'elles représentent ; il me semble que toutes les communes ne seront pas capables de financer des installations similaires à celles du 9^e arrondissement.

M. Benoît Semin. Sur notre site « Projet CO₂ », nous avons mis en ligne de très nombreuses ressources pédagogiques qui vont de l'école primaire jusqu'au lycée voire un peu après. Nous discutons effectivement de sujets comme la

fréquence d'aération. Typiquement, dans une salle de classe « normale », il faut aérer trois fois par heure plutôt qu'une seule fois par heure. C'est très exigeant. La contrainte pour les enseignants est le principal frein. À certaines saisons, il est facile d'ouvrir la fenêtre en permanence s'il n'y a pas de bruit dehors, mais, à d'autres saisons, c'est plus difficile à cause des températures. Par contre, la durée peut être assez courte lorsqu'il y a des courants d'air : en ouvrant portes et fenêtres, cinq minutes peuvent suffire et le taux de CO₂ descend très vite.

M. Fabien Squinazi. Je voudrais compléter ce propos parce que le capteur de CO₂ ne mesure que l'effet de la présence humaine. Or, en période d'inoccupation, il existe également une pollution liée aux matériaux et aux mobiliers. Dans un plan d'aération, il est donc important d'aérer avant l'arrivée des occupants pour éliminer la pollution résiduelle qui s'est accumulée durant la période d'inoccupation, la nuit. Il ne faut pas démarrer l'aération uniquement au moment où entrent les occupants.

De même, si la ventilation mécanique a été à l'arrêt ou si son débit a été réduit, il faut la remettre deux heures avant l'arrivée des occupants pour chasser la pollution résiduelle de la nuit. Dans le plan d'aération, il ne faut donc jamais oublier d'aérer ou de ventiler avant l'arrivée des occupants et après la sortie des occupants.

Avec le CO₂, seule une partie de la pollution intérieure est prise en compte alors qu'il existe d'autres polluants qu'il ne faut pas oublier, notamment le formaldéhyde ou les autres composés organiques volatils.

Vous demandiez si les purificateurs peuvent filtrer de très fines particules, qui sont les particules potentiellement virales. En théorie, oui, puisque le filtre a les capacités de filtrer et de piéger les particules fines à partir d'une certaine taille. Toutefois, en pratique, l'appareil lui-même peut-il attirer ces particules très fines, présentes en suspension dans l'air, et peut-il les filtrer ? C'est une autre histoire et c'est pour cette raison que nous avons besoin d'études en situation réelle, pour mesurer le nombre de particules captées en fonction de leur taille. Surtout, il faut aussi vérifier l'homogénéité du processus dans la pièce car, si nous mettons un appareil de mesure à un endroit, rien ne dit que le nombre de particules sera réduit à d'autres endroits de la pièce, d'où l'importance de mettre en place un protocole pour mesurer l'homogénéité de la réduction des particules.

Plus que l'efficacité de la réduction, notamment par rapport au nombre de particules, l'important est surtout le niveau que l'on obtient. Une ventilation ou une aération réduit le nombre de particules. Qu'apporte en plus le purificateur qui filtre ces particules ? C'est de cette information dont nous avons besoin pour connaître la valeur ajoutée de l'appareil par rapport à la ventilation. Je le rappelle : la ventilation est l'élément essentiel. Ensuite vient la filtration de l'air.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. J'ai deux questions. La première est d'ordre technique, notamment pour les technologies recommandées reposant sur les filtres HEPA. Une mauvaise maintenance peut-elle engendrer des

effets contre-productifs ? J'imagine que oui. Comment donc mieux sensibiliser à la nécessité d'un entretien régulier ? Quelles démarches préconisez-vous ?

Au-delà des ERP dont nous parlons beaucoup ce matin – ce qui est bien normal –, pouvons-nous imaginer que des purificateurs d'air soient utilisés de façon durable, continue, à proximité de zones fortement émettrices, notamment dans les logements ? Je pense à des boulevards connaissant une forte circulation automobile, avec des rentrées d'air de l'extérieur vers l'intérieur. Cette question concerne tout autant le parlementaire que le président du Conseil national de l'air que je suis.

M. Fabien Squinazi. Votre première question est fondamentale. On parle de filtre à très haute efficacité mais il faut protéger ce filtre, c'est-à-dire ne pas le mettre directement en situation d'aspirer ces particules. Plus on protège le filtre à haute efficacité des poussières de l'environnement, de l'air intérieur par exemple, plus sa durée de vie est élevée. Il faut donc recourir à un préfiltre qui élimine les poussières, sinon les filtres à très haute efficacité s'encrassent très rapidement.

Un autre point très important est l'étanchéité. Il ne faut pas que l'air passe à côté du filtre donc il faut assurer l'étanchéité du dispositif. Le changement des filtres doit être fait par des professionnels pour assurer justement l'étanchéité et éviter les fuites d'air ; sinon nous perdrons le bénéfice de la filtration.

Quant à l'emploi des purificateurs au plus près des sources de pollution atmosphérique en général, je pense que nous manquons d'études pour apporter des arguments et dire que nous obtiendrons une réduction des niveaux de polluants atmosphériques à proximité de sources. C'est peut-être un autre débat.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. C'est peut-être le début d'une recommandation qui pourrait figurer dans notre rapport. C'est aussi pour cette raison que nous voulions vous entendre.

Mme Anaïs Guyomarc'h. Je reviens sur votre question relative au filtre. Le risque est en effet qu'il devienne plus dangereux à l'usage s'il n'est pas changé dans les temps.

Plusieurs éléments sont à prendre en compte lorsque nous parlons de filtrage HEPA. Il y a bien sûr la capacité des filtres, c'est-à-dire la quantité de particules qu'ils peuvent emmagasiner dans leur cycle de vie. Il faut aussi être attentif à leur usure, mesurée notamment par différentiel de pression. C'est la méthode la plus sûre aujourd'hui pour savoir à quel moment le filtre est encrassé : il s'agit de mesurer l'écart de pression entre l'amont et l'aval du filtre. Nos appareils s'arrêtent si le filtre est trop encrassé pour ne pas risquer un relargage si l'on continue à l'utiliser. Les purificateurs doivent être en mesure d'indiquer cette usure réelle et le bon moment pour changer les filtres.

Je tiens à préciser que nous sommes tout à fait d'accord avec le fait que la purification et l'aération sont des pratiques complémentaires. L'aération reste la première chose à faire pour renouveler l'air. Par contre, les nombreuses études qui ont été réalisées sur le CO₂ montrent que l'aération de cinq minutes toutes les

vingt minutes est peu pratiquée dans les salles. Tous ces dispositifs ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients mais, cumulés, ils permettent une meilleure protection au quotidien.

M. Manuel Rosa-Calatrava. Je suis complètement en ligne avec M. Squinazi : la ventilation est très importante et les systèmes et technologies de purification de l'air sont des compléments.

Le problème est qu'il est très difficile de maintenir en pratique une ventilation suffisante dans les ERP ou les salles de classe. Ma femme est enseignante en école primaire. Mme la sénatrice l'a rappelé, c'est très compliqué d'aérer la classe toutes les trente minutes ou toutes les quarante-cinq minutes, d'autant que nous allons entrer dans la saison hivernale et qu'il ne faut, à mon avis, absolument pas préconiser d'ouvrir les fenêtres toute la journée car cela provoquerait d'autres problèmes sanitaires vis-à-vis des enfants et des enseignants.

Il est important de caractériser la durée de stabilité des virus infectieux sur les filtres pour proposer un protocole de maintenance et de changement de ces filtres, pour s'assurer des performances ou de la continuité des performances de ces dispositifs mais aussi pour protéger les personnels qui changeront ces filtres. Il est très important d'évaluer la stabilité des virus, notamment dans différentes conditions.

Je ne veux pas entrer trop dans la technique mais les conditions physiologiques de dépôt et de filtration de ces virus sont très importantes : selon la présence et la quantité de mucus ou de salive, la stabilité et la durée de vie des virus infectieux seront très différentes. C'est pour cette raison que nous préconisons de les évaluer au banc d'essai avec de vrais virus infectieux. Il s'agit donc de compléter les caractéristiques techniques de ces dispositifs.

Dans le contexte actuel, il faut procéder avec du SARS-CoV-2 car les virus respiratoires ont des caractéristiques physico-chimiques différentes. Un virus influenza est différent d'un virus SARS-CoV-2 et des coronavirus classiques, comme le 229E, ont aussi des caractéristiques physico-chimiques et des propriétés de stabilité très différentes du virus SARS-CoV-2. Il est donc très important d'évaluer aussi ces dispositifs et ces technologies avec tous ces virus infectieux.

Enfin, je confirme que la pollution atmosphérique par des composés organiques volatils et par des particules physiques est un facteur aggravant des pathologies virales respiratoires. En effet, ces pollutions physiques et chimiques impactent directement la physiologie du tractus respiratoire, notamment l'épithélium qui recouvre notre tractus respiratoire. Leur premier effet est d'empêcher le battement des cils au niveau des cellules épithéliales respiratoires, dont la fonction est d'éliminer les particules et en particulier les particules virales. L'impact physiologique de ces pollutions chimiques et atmosphériques est donc très fort et elles contribuent à la sévérité des pathologies respiratoires infectieuses.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. J'ai deux questions. Une filière spécifique existe-t-elle pour la décontamination des

filtres ? Lorsque de nombreux équipements équipés de filtres seront en fonction, il faudra bien disposer d'une filière de décontamination. Des mesures particulières de transfert de ces filtres avant destruction ou recyclage sont-elles prévues ?

Ma deuxième question est pour la mairie du 9^e arrondissement, que je félicite pour son initiative : a-t-on pu mesurer, dans les classes qui ont bénéficié de ces équipements, s'il s'était produit plus ou moins de cas de Covid ? Ces classes ont-elles dû être fermées ou non ?

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Je vous félicite aussi vivement pour avoir mis en place cette démarche appuyée sur une méthodologie et un protocole et avec le soutien d'associations très impliquées dans ces questions. Vous êtes cependant face à un défi méthodologique assez considérable puisqu'il s'agit de comparer les situations avec et sans purificateur mais aussi de prendre en compte l'influence de l'emplacement des dispositifs dans des salles de classe qui ont des configurations très variables. Il pourrait aussi être question d'étudier les différences d'efficacité selon le modèle de purificateur ou le protocole de remplacement des filtres dans la durée. Comment avez-vous prévu d'évaluer l'ensemble de ces paramètres pour en tirer les meilleures conclusions ? Cela ne doit-il pas s'insérer dans une démarche expérimentale plus générale que ce que vous pouvez faire à l'échelle d'un arrondissement ?

M. Sébastien Dulermo. Nous n'avons pas vraiment pu savoir si l'expérience a eu un effet positif sur les contaminations par le Covid et les fermetures de classes. Les études menées, non pas dans le 9^e arrondissement ou en France mais dans des pays étrangers, ont montré un lien de cause à effet plutôt bénéfique entre l'installation des purificateurs et l'élimination du virus. Dans les écoles du 9^e arrondissement, il y a peut-être eu moins de fermetures et moins de cas de Covid que dans d'autres arrondissements mais je ne pourrai pas vous dire si c'est ou non lié à l'utilisation de ces purificateurs.

Concernant l'expérimentation que nous avons mise en place dans les classes, je pense effectivement qu'il faudrait que nous nous insérions dans un plan beaucoup plus large. À l'échelle d'un arrondissement, c'est compliqué de pouvoir tout faire, nous sommes un peu limités, surtout au niveau de la technique. Nous avons été accompagnés par l'association *Respire*, par les professionnels que sont *Natéosanté* et d'autres qui installent les purificateurs dans les crèches et maintenant dans les réfectoires. Toutefois, pour tester toutes les situations, notamment le fait que les configurations diffèrent d'une classe à l'autre et d'une école à l'autre, il faudrait que nous nous insérions dans un programme beaucoup plus global, c'est certain.

M. Tony Renucci. Suite à l'expérimentation, l'association *Respire* a écrit au ministre de l'Éducation nationale pour lui demander qu'une étude nationale similaire soit menée en France. En effet, cette expérimentation est une première étude en conditions réelles mais elle reste circonscrite dans son périmètre. On nous demande s'il faut généraliser et je pense que c'est la question que nous devons nous poser, avec le recul. Vous parliez tout à l'heure de

recommandations ; cela peut en être une. Comme l'a dit Sébastien Dulermo, d'autres pays l'ont fait, pour confirmer l'efficacité de ces dispositifs avec capteurs de CO₂ et purificateurs d'air et, surtout, pour faire des recommandations sur les protocoles d'installation et de maintenance.

Nous avons écrit au ministre le 25 mai 2021 ; nous n'avons pas encore eu de réponse et il est d'ailleurs dommage qu'aucun représentant de l'Éducation nationale ne soit présent aujourd'hui. Nous sommes souvent arrivés à la conclusion que nous manquons d'études. Demander une étude nationale sur ce sujet est clairement une recommandation importante à formuler.

Mme Isabella Annesi-Maesano. Je voudrais féliciter également la mairie du 9^e arrondissement et rebondir sur la dernière réponse pour rappeler que l'Inserm avait financé une étude concernant quand même 9 000 enfants dans laquelle nous avons mesuré le CO₂. D'autre part, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) – dans le conseil scientifique duquel Fabien Squinazi et moi sommes présents – a commencé une étude mais il manque encore de nombreuses informations.

Nous avons besoin de faire de la recherche sur le plan national et sur le plan public, avec des partenaires tels que Natéosanté. Les compétences existent mais, si je peux me permettre, il ne faut pas se priver de dire dans votre rapport que nous avons besoin de données. Nous avons entendu dire de nombreuses fois qu'il est impossible de répondre car nous n'avons pas les données et je trouve que c'est dommage, alors que nous avons des compétences en France et que nous sommes en lien avec d'autres chercheurs.

J'ai beaucoup travaillé dans les écoles, dans le cadre de l'étude SINPHONIE (*Schools indoor pollution and health : observatory network in Europe*) financée par l'Union européenne. Nous avons un capteur de CO₂ et les enfants, lorsque le voyant rouge s'allumait, voulaient absolument ouvrir à la fenêtre. Ils participaient beaucoup. Nous avons fait une affichette pour les informer sur la pollution, sur l'importance de l'aération, etc.

M. Manuel Rosa-Calatrava. Madame la sénatrice, nous avons pris l'initiative en région Auvergne-Rhône-Alpes de construire une filière avec plusieurs acteurs tels que des laboratoires académiques mais aussi des industriels, des start-up et des petites et moyennes entreprises (PME). Il s'agit, dans ce domaine de la décontamination microbiologique de l'air et des surfaces, de construire une filière ambitieuse pouvant avoir un rayonnement international et de contribuer très significativement à apporter des données pour proposer des protocoles et des technologies sur la décontamination de l'air en particulier. Je pourrai fournir des éléments d'information sur ce projet de filière en région Auvergne-Rhône-Alpes, qui est assez avancé.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. Pour l'instant, quand vous retirez les filtres, que deviennent-ils ?

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Monsieur Rosa-Calatrava, vous avez dit que vous pourriez apporter des éléments complémentaires. Ma collègue Angèle Prévile et moi-même en sommes preneurs.

Mme Anaïs Guyomarc'h. Je vais rebondir sur la question en m'appuyant sur une étude du professeur Rosa-Calatrava. En Auvergne-Rhône-Alpes ont été testés à la fois l'abattement de virus dans l'air et la persistance des particules infectieuses sur le filtre. D'après cette étude menée par VirPath, il n'existait plus de virus infectieux sur le filtre après quarante-huit heures.

La persistance des virus sur les surfaces étant relativement faible, elle n'a pas d'impact sur la maintenance. Des filières de revalorisation des déchets peuvent quand même être mises en place pour ces filtres mais, d'un point de vue biologique, aucune étude n'a démontré un danger lors de la maintenance.

Mme Huguette Tiegna, députée. Ma première question concerne les technologies utilisées. Nous parlons beaucoup des purificateurs d'air. Il existe aussi des solutions mobilisant un laser pour détruire toute forme de virus dans une salle. J'aimerais savoir si ce type de solution a été étudié.

Ma deuxième question concerne les enfants en bas âge, notamment dans les crèches. À cet âge, les enfants font leur immunité et je voudrais savoir si des expérimentations de purificateurs d'air ont été menées dans des crèches, au-delà de ce que les différentes mairies ont mis en place pour des écoles.

M. Manuel Rosa-Calatrava. Je remercie Mme Guyomarc'h d'avoir rappelé les données générées par l'étude que nous avons menée en début d'année sur les filtres HEPA H14 et H13. Je confirme que, quarante-huit heures après le dépôt de virus SARS-CoV-2 infectieux, la contamination résiduelle se situe en dessous de la limite de détection du virus infectieux mais cela ne signifie pas que ces filtres, après un fonctionnement donné *in situ*, ne seront plus infectieux. Il manque des données véritablement *in situ* ou en banc d'essai de grand volume pour dire, en fonction du mode et de la durée de fonctionnement de ces dispositifs ainsi que de leurs caractéristiques techniques, si ces filtres présentent ou non un danger infectieux après un temps donné.

Mme Isabella Annesi-Maesano. Pour répondre à la question portant sur les crèches, une ancienne étude de l'Inserm a montré que les enfants étaient exposés à des polluants liés au nettoyage, celui-ci apportant des composants organiques volatils qui, comme cela a été dit tout à l'heure, abîment les muqueuses. Malheureusement, les rares études qui existent ne sont pas vraiment représentatives de la vie réelle. Encore une fois, nous manquons de données mais il s'agit d'une population très importante parce que les enfants sont en formation et il faut les protéger.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Ce qui se dégage de cette audition est qu'il s'agit d'un sujet majeur mais qui a besoin de beaucoup mûrir. Nous voyons toutes les incertitudes sur les questions épidémiologiques, les incertitudes sur l'efficacité des dispositifs, en particulier la comparaison entre

l'efficacité *in situ* et en laboratoire. Que dire avec des particules réelles de virus ? Nous avons vu les difficultés de méthodologie : la pollution PM 2,5 a été étudiée faute de mieux en se disant que, si la purification avait un effet sur les PM 2,5, elle pouvait aussi en avoir sur quelque chose qui est plutôt de l'ordre de 0,1 micron, tel que le virus. Évidemment, tout ceci est lié, et la purification et l'aération sont intéressantes à la fois en soi et en raison de la synergie entre la pollution, les taux excessifs de CO₂ et le virus.

Je regrette que nous n'ayons pas pu avoir aujourd'hui de représentant du ministère de l'Éducation nationale, qui a été sollicité par nos soins. Il est évidemment de notre devoir de revenir à la charge pour avoir une position officielle du ministère.

Nous avons peu parlé des diverses technologies et certaines questions des internautes sont complémentaires de nos échanges à cet égard ; c'est pourquoi je propose de tenter d'y répondre dans la mesure du possible. Plusieurs questions portent sur l'organisation et le niveau national ; d'autres concernent ce qui est au-delà des espaces clos dont nous avons parlé jusqu'ici parce que ce sont les principaux lieux de transmission.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Nous avons reçu un nombre de questions assez conséquent – une trentaine – que nous avons regroupées selon dix thèmes. Nous ne pourrions pas toutes les aborder ici. Je vais en poser un certain nombre et, à la fin de l'audition, nous les transmettrons aux intervenants en leur demandant de bien vouloir prendre le temps par la suite de nous envoyer quelques éléments de réponse pour alimenter le débat et notre réflexion sur le rapport. Je précise cela pour que les internautes ne se sentent pas frustrés, qu'ils ne pensent pas que nous avons écarté un certain nombre de questions. Nous sommes dans la transparence.

Première question, que je pose très directement : est-il possible de contrôler et de purifier l'air dans les transports en commun ? Nous savons que c'est un sujet majeur, notamment pour le métro.

Une question est revenue plusieurs fois sur la stérilisation de l'air par les UV-C « *upper room* » ou en haut de pièce. Connaissez-vous cette technologie ? Pensez-vous qu'elle présente un intérêt ?

Plusieurs questions portent sur la dimension économique : la généralisation des capteurs et des purificateurs, en particulier dans les écoles, est-elle un investissement rentable compte tenu des contaminations évitées ? Pouvons-nous parler de rentabilité ? Comment essayer de se projeter sur cette question économique ?

Nous avons aussi une question sur le fait que l'État a annoncé une aide financière pour les collectivités locales pour l'achat de capteurs de CO₂. Une cellule nationale d'expertise et d'aide opérationnelle pourrait sans doute accélérer les déploiements et mutualiser les efforts. Que pensez-vous de l'idée de créer une telle cellule, ou tout au moins d'avoir une organisation nationale ?

M. Tony Renucci. Le sujet des transports en commun fait partie de l'actualité de l'association Respire puisque nous avons porté plainte contre la RATP pour la pollution de l'air intérieur aux enceintes ferroviaires. Je pense que la question est liée à cette actualité. Nous avons déposé cette plainte pour deux raisons : l'insuffisance de la surveillance de la pollution dans les enceintes ferroviaires et le manque de transparence.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Qu'entendez-vous par « enceintes ferroviaires » ?

M. Tony Renucci. Cela concerne tout ce qui est souterrain, c'est-à-dire le métro, les stations, etc.

Il existait trois stations de mesure voici encore quelques semaines pour tout le réseau RATP, ce qui est très faible par rapport à la densité du réseau. Deux stations ont été ajoutées depuis. Nous avons fait deux études, dont une portant sur dix stations en partenariat avec le CNRS dans laquelle nous avons démontré que l'air était dix fois plus pollué à l'intérieur qu'à l'extérieur, sachant que l'air extérieur est déjà pollué, et que nous ne respectons ni les normes européennes ni les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'amélioration passera par un système de mesure plus étendu, plus dense donc plus précis, et par la transparence des mesures réalisées.

Deux aspects peuvent faire l'objet de recommandations. Le premier est la purification ; je sais que le sujet est étudié en ce moment par la région Île-de-France, en lien avec Île-de-France Mobilités. Le second porte sur le freinage parce que les particules fines et très fines sont notamment issues des systèmes de freinage, sûrement en raison aussi du manque d'investissements sur ce point. Il faudrait savoir comment capter plus près de la source les particules issues des frottements entre les roues, le rail et le système de freinage. Des procédés d'aspiration des particules se mettent en place. Ensuite, c'est une question d'investissements et d'argent.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Sûrement aussi de mise au point de ces technologies.

M. Matteo Redaelli. Je souhaite répondre sur la purification de l'air dans le métro. Nous avons publié en 2015 un rapport d'expertise concernant les risques pour les travailleurs exposés à la pollution de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Nous avons dressé un état de l'art à la fois des effets sur la santé de ces particules dans ces enceintes et sur les techniques et les mesures de gestion mises en place ou exploratoires à l'époque. Les régions avaient déjà effectué un certain nombre de travaux avant ce rapport et ont continué depuis pour améliorer l'état de l'air.

Je tiens à rappeler un point important. On dit souvent que l'air dans le métro est beaucoup plus pollué que l'air extérieur, avec des concentrations en masse qui sont trois, quatre, cinq ou dix fois supérieures à ce qui est trouvé à l'extérieur. Certes, mais il s'agit des concentrations en masse de particules de

freinage, donc de particules métalliques ayant une densité beaucoup plus importante et une composition qui n'a à peu près rien à voir avec ce qui peut être trouvé à proximité du trafic routier. Il faut souligner ce point. Ceci étant, c'est évidemment une problématique qu'il faut traiter.

L'Anses n'a à ce jour pas investigué la question de la purification dans le contexte du Covid-19. Je sais que des dispositifs ont été testés dans le métro new-yorkais, avec des traitements UV dans un caisson situé au-dessus des rames. Un système d'aspiration fait passer l'air sous un traitement UV puis le réinjecte dans la rame. C'est le seul principe que je connaisse ; il en existe peut-être d'autres et je ne peux donc pas être exhaustif sur la question et encore moins sur l'efficacité de ces méthodes.

Par ailleurs, à ce jour, aucun cluster n'a été mis en évidence dans le métro, que ce soit dans la littérature scientifique ou à partir des données de Santé publique France. Cela ne signifie pas qu'il n'en existe pas car il faut faire attention aux biais d'information mais nous n'avons pas d'information sur des clusters qui seraient apparus dans les rames de métro.

Nous travaillons de nouveau sur la pollution de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Comme les travaux sont en cours, nous n'avons malheureusement pas grand-chose à communiquer sur le sujet mais, d'ici l'année prochaine, une mise à jour sera faite de ce que nous savons des effets sur la santé de l'exposition des usagers à cette pollution. Nous prévoyons également de fournir des recommandations et des valeurs guides pour aider, nous l'espérons, à améliorer ces conditions de pollution de l'air.

M. Benoît Semin. Avec des collègues, nous avons fait quelques mesures de CO₂ dans le réseau parisien. Nous n'avons pas observé de taux de CO₂ élevés dans les stations mais ce n'était pas du tout une mesure systématique. Par contre, nous avons observé des valeurs de CO₂ élevées dans certaines rames, notamment dans le RER B ou le RER C, avec une différence vraiment importante suivant que les fenêtres sont ouvertes ou fermées. Cela paraît évident mais cela change tout. Le fait que même de petites fenêtres soient à moitié ouvertes permet de passer sous les 800 ppm de CO₂. Il est donc très facile d'améliorer la situation pour le SARS-CoV-2.

Mme Isabella Annesi-Maesano. Pour rebondir sur ce qui a été dit à propos des études dans les transports en commun, le sujet de recherche n'était pas le même. La question posée concerne les mesures au niveau d'une station ou de plusieurs stations. En mettant des capteurs dans les stations – très peu sont en place dans le réseau d'Île-de-France –, on peut répondre sur la qualité de l'air à un endroit donné.

La question consistant à savoir ce qu'il se passe dans le train est différente et ce que nous venons d'entendre sur le niveau de CO₂ dans les rames est la vraie réponse à cette question. Si je ne me trompe pas, une polémique a eu lieu au niveau des TGV car le personnel s'était promené avec des capteurs de CO₂ dans

les rames et avait trouvé un problème de qualité de l'air. L'air présent dans le TGV est recyclé alors que ce n'est pas le cas dans les avions.

Je précise aussi que les freinages produisent *a priori* de très grosses particules. Nous nous intéressons plutôt aux particules ultrafines qui restent en suspension dans l'air.

Il existe quelques publications sur de possibles clusters de Covid dans les trains, malheureusement à prendre avec des pincettes parce qu'elles ne sont pas de bonne qualité. En effet, il est difficile de suivre les sujets et de savoir s'ils ont vraiment été contaminés dans le train ou dans le métro.

M. Manuel Rosa-Calatrava. Pour répondre de manière concise aux internautes, nous évaluons actuellement plusieurs dispositifs de purification d'air, avec des filtres fonctionnalisés ou d'autres technologies comme les UV-C, à la demande d'équipementiers et d'industriels. Il s'agit justement d'évaluer des dispositifs qui pourraient être déployés dans les véhicules personnels ou dans les transports en commun.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Je vous propose de prendre une dernière question. Les autres seront transmises aux intervenants qui auront, j'imagine, la gentillesse de bien vouloir essayer d'y apporter des réponses écrites.

Cette question est : « *Les hôpitaux possèdent-ils des protocoles spécifiques contre la transmission du virus par voie aérosols, à la fois dans leur fonctionnement mais aussi dans la conception des pièces ?* » Peut-être lançons-nous ici un nouveau débat : à votre connaissance, existe-t-il à ce stade des réflexions, des débuts de réflexion ou avez-vous vous-même des idées à soumettre ? Je lance volontairement le débat autour de ce sujet qui est revenu à plusieurs reprises.

M. Fabien Squinazi. J'ai présidé une commission de l'AFNOR sur les salles propres pendant vingt ans. Nous avons beaucoup travaillé sur le milieu hospitalier et notamment sur toutes les salles à environnement protégé. Effectivement, dans des zones à risque en milieu hospitalier, des conditions très particulières de ventilation et de filtration de l'air en général sont prévues. Des contrôles sont réalisés sur la contamination particulière dans ces locaux. Je pense donc qu'il n'existe pas de sujet dans ces locaux, qui sont complètement maîtrisés.

En revanche, la question peut se poser dans des chambres de malades. Tout récemment, j'ai publié avec des collègues hospitaliers des travaux sur la recherche, non pas du virus lui-même, mais de l'ARN viral qui est une trace de la présence du virus. Nous en avons trouvé dans les chambres de patients Covid, d'où l'importance de pouvoir, en l'absence de ventilation mécanique, aérer ces chambres pour éviter la transmission, notamment lorsque ce sont des chambres doubles. Dans les autres zones contrôlées de ces établissements, comme les blocs opératoires ou les réanimations, la qualité de l'air et la contamination de l'air sont tout à fait maîtrisées. Il existe d'ailleurs des normes hospitalières en la matière.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. J'aimerais m'appuyer sur deux des questions posées en ligne pour demander quelques éléments supplémentaires sur les techniques de stérilisation. L'une des questions est : « *Que penser des technologies de stérilisation de l'air par UV-C en haut de pièce ? Connaissez-vous cette technologie ? Pensez-vous qu'elle présente un intérêt ?* » Nous avons entendu mentionner brièvement dans l'une des interventions que de tels protocoles se mettaient en place.

Une autre question est : « *Quelle est votre position vis-à-vis du déploiement et de l'utilisation de purificateurs d'air ayant un système à base de plasma pour désactiver les pathogènes ? Comment les tester et les certifier de façon indépendante comme sûrs ? Faut-il réglementer les normes des purificateurs d'air ?* ». À titre personnel, je sais que se trouve dans ma propre circonscription une entreprise incubée à l'École Polytechnique qui développe une technique de plasma froid pulsé. Elle est actuellement en phase de recherche et développement. Que penser de ces technologies ? M. Squinazi a dit tout à l'heure qu'en matière de purification, il faut faire attention aux produits secondaires qui pourraient être synthétisés. Pouvez-vous en dire davantage et quand pouvons-nous espérer avoir des comparatifs des différentes technologies disponibles ?

M. Fabien Squinazi. Effectivement, il existe des technologies que nous n'avons quasiment pas évoquées ce matin puisque nous avons beaucoup parlé de la filtration de l'air. J'y ai fait allusion rapidement dans mon exposé.

Le problème des techniques destructives est qu'elles peuvent générer des produits secondaires, notamment de l'ozone, avec des champs électriques comme le plasma froid. La photocatalyse peut aussi générer des produits secondaires. Il faut donc rester prudent.

Des études de laboratoire ont montré que ces technologies sont efficaces sur les micro-organismes mais, lorsqu'elles sont intégrées dans un appareil, la question n'est plus celle de l'efficacité de la technologie elle-même mais de l'appareil tout entier. Beaucoup de technologies sont efficaces en laboratoire mais, sur le terrain, c'est un peu plus compliqué. C'est pourquoi nous avons besoin d'études complémentaires. C'est une bonne chose d'avoir des technologies efficaces mais il faut ensuite pouvoir les vérifier sur le terrain.

Les UV-C sont effectivement connus pour être efficaces. Cependant, quels résultats donnent-ils ? Certains purificateurs ont des lampes UV mais certains génèrent des UV-C dans la pièce. Toutes ces technologies méritent d'être validées *in situ* pour s'assurer de leur efficacité. Nous manquons encore d'éléments pour apporter les réponses attendues.

M. Cédric Villani, député, président de l'Office. Pour rebondir sur cette question, des programmes sont-ils en cours ?

M. Fabien Squinazi. Oui, nous essayons d'y travailler mais nous aimerions bien un programme national pour monter un protocole d'essai et savoir enfin si ces systèmes d'épuration apportent quelque chose de plus par rapport à la

ventilation. La grande difficulté est que, parfois, un seul appareil ne suffit pas et qu'il en faut deux voire trois pour être efficace dans une pièce. Tout dépend de la géométrie et de la configuration de la pièce.

Mme Isabella Annesi-Maesano. Une question avait été posée sur la dimension économique. Nous parlons de tester des appareils, d'en mettre plusieurs. Il faut évidemment que, dans ce programme national que nous préconisons, un calcul soit fait du coût des appareils envisagés. Il faut aussi considérer les coûts à long terme et les coûts indirects parce que, parfois, nous nous focalisons trop sur l'immédiat et les coûts sont ailleurs.

M. Jean-Luc Fugit, député, rapporteur. Vous avez parfaitement raison ; il faut essayer d'avoir une approche et une analyse économique complètes. Je pense que ces points ressortiront de nos travaux.

Nous remercions nos intervenants, ainsi que celles et ceux qui ont suivi en ligne cette audition et qui ont envoyé des questions ; nous les regrouperons et les transmettrons à nos intervenants, pour qu'ils apportent quelques éléments de réponse supplémentaires par écrit.

Cette audition publique était très riche, très complète et a permis de voir que ce sujet est de plus en plus étudié, ce qui est rassurant. Il s'agit d'une question de santé environnementale qui me paraît majeure et, le 15 décembre, lors d'une des prochaines séances du Conseil national de l'air que je préside, nous présenterons certains résultats de ces travaux pour les partager avec l'ensemble des membres du Conseil national de l'air. Celui-ci regroupe des acteurs de tous types et de tous secteurs, aussi bien les associations environnementales que les représentants du monde agricole, du monde industriel ou du monde du bâtiment ainsi que les ministères.

Au nom de l'Office, je remercie une nouvelle fois tous les intervenants.

TRANSMISSION DU CORONAVIRUS DANS LES MILIEUX CONFINÉS, LES CAPTEURS DE CO₂ ET LES PURIFICATEURS D'AIR : QUESTIONS DES INTERNAUTES

1) *Pourquoi la France ne réalise-t-elle pas un audit national de la qualité de l'air dans les écoles, comme l'a fait l'Australie, afin d'investir dans des filtres HEPA là où c'est nécessaire pour protéger les enfants contre les contaminations au coronavirus ?*

M. Tony Renucci, association RESPIRE. Je ne connais pas les véritables raisons, mais comme dit lors de l'audition, il faut une étude nationale sur le sujet des capteurs de CO₂ et purificateurs d'air, afin notamment de définir les bons protocoles d'utilisation dans l'Éducation nationale. J'ai écrit au ministre de l'Éducation nationale le 25 mai 2021 dans ce sens : <https://www.respire-asso.org/purificateurs-lettre-au-ministre/>

2) *Plusieurs questions portent sur une potentielle décision du Gouvernement d'installer des détecteurs de CO₂ et purificateurs dans les toutes les écoles, dans le cadre de la lutte contre l'épidémie et la pollution de l'air intérieur, par exemple : « Pourquoi la France n'investit-elle pas massivement pour la qualité de l'air intérieur des écoles, notamment en équipant à court terme avec des filtres HEPA les cantines, les gymnases et toutes les salles où le taux de CO₂ ne peut être descendu en dessous du seuil de 700 ppm par ventilation naturelle ? »*

M. Tony Renucci, association RESPIRE. Voir la réponse précédente. J'ajouterais que le fait d'équiper tous les lieux publics recevant du public en espace clos est une bonne chose. Nous allons d'ailleurs mettre à jour notre étude du 9^e arrondissement de Paris en regardant aussi les résultats sur les crèches et, en complément, nous préparons un travail plus important sur l'utilité de ces dispositifs chez l'habitant face aux maladies hivernales.

3) *Est-il possible de contrôler et de purifier l'air dans les transports en commun ?*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». Il est possible de contrôler l'air dans les transports en commun à l'aide des mêmes outils que dans les autres locaux (capteurs de CO₂ par exemple).

Nous avons constaté dans les rames des transports en communs parisiens que l'ouverture des fenêtres permet de diminuer beaucoup le taux de CO₂, bien que ces fenêtres soient petites (voir figure 1).

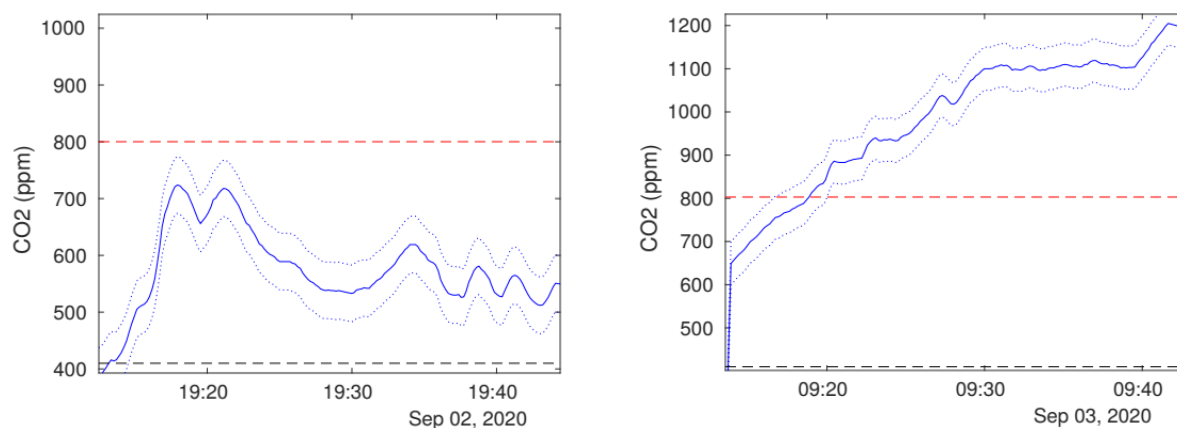


Figure 1. Mesures de taux de CO₂ dans des RER C double étage, 40 personnes environ (faible affluence), même trajet. Gauche: fenêtres ouvertes, droite : fenêtres fermées.

En Asie, où la prise en compte du risque aérosol a eu lieu dès le début de l'épidémie (en partie grâce aux leçons apprises pendant l'épidémie de SARS-CoV-1), les consignes d'ouverture des fenêtres ont été données très tôt :

https://www.tokyometro.jp/lang_en/info/205771.html?width=816&height=650

<http://m.koreaherald.com/amp/view.php?ud=20200512000313>

Il est possible de purifier l'air dans les TGV en remplaçant les filtres actuels par des filtres HEPA. Exemple de réalisation technologique :

<https://www.alstom.com/fr/un-air-assaini-grace-au-filtre-antiviral-pepa-f>

M. Tony Renucci, association RESPIRE. Oui, j'ai répondu lors de l'audition sur cette question. On peut agir sur le réseau de surveillance (déploiement de stations de mesure), sur la purification (purificateurs d'air dans les stations) et à la source de l'émission de particules (technologie de captation des particules au freinage).

- 4) *Plusieurs questions portent sur la protection apportée par les différents types de masques face aux contaminations par voie aérosol, par exemple : « Quelle est l'efficacité comparative des masques chirurgicaux, des masques N95 et des masques FFP2 face aux aérosols ? Des aides financières pour l'achat de masques pourraient-elles être apportées aux Français ? »*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». De nombreuses études ont montré que les masques, y compris les masques chirurgicaux, limitent fortement la transmission par aérosols dans les espaces intérieurs.

Les masques conformes aux normes N95 ou FFP2 sont plus efficaces que les masques chirurgicaux pour limiter le risque aérosols.

Remarque : l'efficacité d'un masque diminue s'il est mal ajusté ; l'efficacité en condition réelle ne dépend pas seulement du type de masque mais aussi de la manière dont il est utilisé.

Sources :

- Wang et al., Science, 373, 981 (2021)

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abd9149>

- Oksanen et al, Int J Occup Med Environ Health 2021;34(2):239–249

<http://ijomeh.eu/Sources-of-healthcare-workers-COVID-19-infections-and-related-safety-guidelines.132898.0.2.html>

- Mitze et al, PNAS 2020

<https://www.pnas.org/content/117/51/32293>

- 5) *Les hôpitaux possèdent-ils des protocoles spécifiques contre la transmission du virus par voie aérosol à la fois dans leur fonctionnement mais aussi dans la conception des pièces ?*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». Nous avons effectué quelques mesures dans des hôpitaux, et nous avons constaté que la qualité de la ventilation dépend de la pièce considérée : certaines pièces sont insuffisamment ventilées, en particulier des

chambres doubles et des salles de réunion du personnel. Nous allons continuer à effectuer des mesures supplémentaires dans la mesure de nos possibilités.

En effet, les contaminations dans les hôpitaux sont nombreuses et touchent des personnes déjà fragilisées et fortement susceptibles de développer des formes graves de la Covid-19. Je pense que des mesures plus systématiques de la qualité de la ventilation dans les hôpitaux seraient extrêmement utiles.

Sources concernant le caractère nosocomial de la Covid-19 :

- Zhou et al, Ann Transl Med 2020;8(10):629

<https://atm.amegroups.com/article/view/42877/html>

- Santé publique France, Point épidémiologique hebdomadaire du 03 septembre 2020

<https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-et-infections-respiratoires/infection-a-coronavirus/documents/bulletin-national/covid-19-point-epidemiologique-du-3-septembre-2020>

6) *Des analyses économiques montrent-elles que la généralisation des capteurs et des purificateurs, en particulier dans les écoles, n'est pas un investissement rentable, compte tenu des contaminations évitées ?*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». Voici quelques éléments de réponse :

- L'aération diminue fortement les transmissions de la Covid-19. Il s'agit d'une mesure efficace ;
- Les coûts économiques d'une infection par la Covid-19 sont élevés (arrêt maladie, coût des soins) ;
- Il me semble pertinent de comparer le prix de l'investissement dans l'aération et les purificateurs d'air aux autres mesures de freinage de l'épidémie : confinements, fermetures des restaurants, tests, ...

Par exemple, 85 milliards d'euros de déficit supplémentaire en 2020 au budget de l'État : <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/le-budget-de-letat-en-2020-resultats-et-gestion>

Le coût des capteurs de CO₂, de l'amélioration de l'aération et des purificateurs d'air est très nettement inférieur au coût global lié à la Covid-19.

M. Tony Renucci, association RESPIRE. A ma connaissance, il n'existe pas de telle étude pour l'instant. Toutefois, dans l'expérimentation du 9^e arrondissement, au niveau du coût, la facture d'électricité n'a pas explosé. Nous n'avons pas fait de corrélation avec les contaminations, ce n'était pas l'objet de l'étude.

7) *L'État a annoncé une aide financière pour les collectivités locales pour l'achat de capteurs de CO₂. Une cellule nationale d'expertise et d'aides opérationnelles pourrait sans doute accélérer les déploiements et mutualiser les efforts. Que pensez-vous de la création d'une telle cellule ?*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». De nombreux capteurs de CO₂ sur le marché sont défectueux. Certaines collectivités territoriales ont acheté ces capteurs défectueux ; de nombreuses collectivités ne disposent pas des compétences techniques pour assurer un déploiement efficace des capteurs de CO₂. Une structure nationale pourrait être

utile pour fournir les informations fiables aux collectivités locales. Nous sommes prêts à fournir notre aide concernant les aspects scientifiques et techniques si nécessaire.

M. Tony Renucci, association RESPIRE. Ce serait une excellente chose. Il faut à la fois dédier un budget pour l'équipement et une cellule opérationnelle de déploiement, qui pourrait notamment piloter le suivi de la maintenance.

8) *Quel est le budget nécessaire afin d'installer des détecteurs de CO₂ dans les écoles ainsi que des purificateurs d'air à technologie HEPA ?*

M. Benoit Semin, membre du collectif « Projet CO₂ ». Voici une estimation haute du prix des capteurs de CO₂ :

Il existe environ 500 000 classes en France avec environ 12 000 000 d'élèves et en moyenne 24 élèves par classe (<https://www.education.gouv.fr/les-chiffres-cles-du-systeme-educatif-6515>). L'achat d'un capteur de CO₂, fabriqué en France, pour chaque classe avec un prix unitaire de 300 euros coûterait au total 150 millions d'euros.

En réalité, il est possible de mutualiser les capteurs entre plusieurs salles dans les établissements correctement ventilés. Le développement de technologies moins chères (photo-acoustique) ainsi qu'une mutualisation des achats (UGAP) peuvent aider à diminuer les coûts.

Une comparaison avec d'autres pays (figure 2) donne un coût d'environ 80 millions d'euros.

Détecteurs de CO ₂	Coût (millions €)	Habitants (millions)	Coût par habitant
Irlande	4	4,9	0,8
Québec	10	8,5	1,2
Luxembourg	1	0,61	1,6
Royaume-Uni	29	67	0,4
France	81	67	1,2

*Le coût pour le Québec est estimé car seul le nombre de capteurs est connu : 48 000
Pour la France, nous avons retenu une moyenne du coût par habitant*

Figure 2. Évaluation du coût des capteurs de CO₂, par comparaison avec d'autres pays.
Données complètes sur <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1EDW5TNhMJanA-SPkR08RXoKnB35fhQPulVctxAihxA/edit#gid=1439674050>

Estimation du prix maximal des purificateurs d'air : 2000 euros par purificateur, soit 1 milliard d'euros pour équiper toutes les classes.

Remarque essentielle : les purificateurs d'air sont à utiliser en deuxième intention, si une ventilation/aération suffisante n'est pas possible. Il n'est pas pertinent d'équiper toutes les salles.

La comparaison avec d'autres pays (figure 3) donne un coût de 300 millions d'euros. Il s'agit encore d'une estimation haute, ces pays ont des hivers plus rigoureux qu'en France, et l'aération est moins facile.

Purificateurs d'air	Coût (millions €)	Habitants (millions)	Coût par habitant
New-York	37	8,4	4,4
Allemagne	400	83	4,8
France	309	67	4,6

*A New-York, le type de purificateurs choisi fait débat car il ne s'agit pas de systèmes à filtr
En Allemagne, l'état fédéral propose une aide de 200 M€ complétée par les collectivités lo
Pour la France, nous avons retenu une moyenne du coût par habitant*

Figure 3. Évaluation du coût des purificateurs d'air, par comparaison avec d'autres pays.

Dans de nombreux établissements, l'amélioration de la ventilation peut se faire à court terme en ouvrant les fenêtres, ce qui demande peu ou pas de travaux. Les capteurs de CO₂ sont utiles dans ce cas pour ventiler suffisamment mais pas trop (une forte ventilation en hiver provoque des dépenses d'énergie superflues). A long terme, l'amélioration de la ventilation peut être couplée aux travaux de rénovation énergétique des bâtiments, en utilisant des ventilations double flux par exemple.

Les cantines, où le port du masque n'est pas possible, sont des lieux propices aux contaminations, à sécuriser en priorité si les moyens ne permettent pas de sécuriser toutes les salles immédiatement.

M. Tony Renucci, association RESPIRE. Les coûts d'achat ont été donnés pendant l'audition par M. Sebastien Dulermo. Les prix ont cependant fortement augmenté depuis.

Une question portant sur l'intérêt éventuel des technologies de stérilisation de l'air par « UV-C haut de pièce » n'a pas reçu de réponse. Il en est de même pour une question portant sur les purificateurs d'air ayant un système à base de plasma.