

# Pandémie de Covid-19 : contribution de la métrologie à l'évaluation de l'efficacité de filtration des masques de protection

Par François GAIE-LEVREL, Alexandre BESCOND,  
Axel FOUQUEAU, Tatiana MACÉ  
et Sophie VASLIN-REIMANN

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Paris

En 2020, la communauté scientifique et l'Organisation mondiale de la santé confirmaient le risque de transmission aérienne du coronavirus Sars-CoV-2. En raison de la pénurie mondiale de masques, plusieurs pays ont introduit de nouveaux types de protection. Dans ce contexte, la Commission européenne a identifié le besoin urgent d'harmoniser les exigences en la matière, notamment en termes de performances de filtration et de confort associées au port du masque. Un guide de l'Afnor et un guide européen CEN ont alors été élaborés ; et, en lien avec les demandes des pouvoirs publics français formulées pendant le premier confinement, en 2020, le LNE a été mobilisé afin de répondre à la question centrale de l'efficacité des masques de protection apportant en la matière toute son expertise en métrologie des aérosols. Pour ce faire, une plateforme expérimentale a été développée en un temps record pour évaluer l'efficacité de filtration de différents types de masques de protection. Ce nouveau moyen d'essai permet, depuis le début de la crise, d'accompagner les pouvoirs publics, les industriels et les importateurs dans la qualification des masques FFP2, chirurgicaux, barrières et grand public. Dans cet article, nous présentons le banc expérimental développé par le LNE pour réaliser les mesures d'efficacité de filtration des masques barrières et grand public, ainsi que les comparaisons inter-laboratoires organisées dans ce cadre. En termes de perspectives, des axes d'amélioration du contexte normatif associé à chaque type de masques sont également présentés.

## Introduction

La science des aérosols a permis de développer les connaissances associées au comportement, à la métrologie et à l'impact sanitaire des particules en suspension dans l'air. Le terme « aérosol » désigne la suspension de ces particules dans un gaz (notamment l'air), dont la taille peut aller de quelques nanomètres à 100 micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Depuis le premier confinement associé à la crise sanitaire due à la Covid-19, les aérosols sont devenus omniprésents, aussi bien dans les médias que dans nos vies, à travers notamment l'impact sanitaire des particules dites ultra-fines (ou PUF), en lien avec le contexte de dégradation de la qualité de l'air sous l'effet de la pollution atmosphérique. Cette omniprésence des aérosols a également été ressentie avec le port obligatoire des masques de protection.

En 2020, la communauté scientifique et l'Organisation mondiale de la santé confirmaient le risque de transmission aérienne du coronavirus Sars-CoV-2 (OMS, 2020). Le Haut Conseil de la santé publique a rédigé un rapport associé à une analyse de la littérature scientifique afin d'étudier les modalités des émissions de particules associées à la parole, à la toux et aux éternuements et les effets du port du masque au regard de ces émissions (HCSP, 2020). Les travaux de Galton *et al.* (2011) ont montré que les particules générées lors des activités respiratoires sont caractérisées par des tailles allant de 10 nm à 500  $\mu\text{m}$ . Cette gamme de taille varie fortement en fonction des individus (Lee *et al.*, 2019), mais également en fonction des conditions environnementales (Xie *et al.*, 2007 ; Ji *et al.*, 2018). En lien avec l'hétérogénéité des distributions granulométriques des particules émises par un individu, il a été supposé que le diamètre de ces particules est

principalement inférieur à 5  $\mu\text{m}$  (Asadi *et al.*, 2019 ; Johnson *et al.*, 2011 ; Morawska *et al.*, 2009 ; Papineni et Rosenthal, 1997). Plus récemment, Van Doremalen *et al.* (2020) ont observé que le coronavirus Sars-CoV-2 restait viable et infectieux en phase aérosol pendant au moins 3 heures. En considérant la taille des virus de type corona, tels que le Sars-CoV-2, à savoir une taille comprise entre 60 et 140 nm (Kim *et al.*, 2020 ; Matsuyama *et al.*, 2020 ; Park *et al.*, 2020 ; Ren *et al.*, 2020), la transmission du virus par voie aérosol pourrait être une hypothèse plausible (Asadi *et al.*, 2020). Ce débat a eu lieu dès les toutes premières semaines de la pandémie. Un nombre limité d'études ont été réalisées dans des conditions réalistes, mais elles ont fourni des conclusions contradictoires (Faridi *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2020 ; Santarpia *et al.*, 2020). Cela a mis en évidence la nécessité de disposer de masques faciaux bien caractérisés afin de limiter la propagation de la pandémie (Liang *et al.*, 2020).

En raison de la pénurie mondiale de masques, plusieurs pays ont introduit de nouveaux types de masques dits « barrières » et « grand public » (CoFC, pour Community Face Covering) (Konda *et al.*, 2020 ; Pei *et al.*, 2020 ; Zhao *et al.*, 2020 ; Clapp *et al.*, 2020). En outre, une stratégie de traitement et de réutilisation des masques chirurgicaux a été étudiée (Charvet *et al.*, 2022 ; ANSM, 2020b). Dans ce contexte, la Commission européenne a identifié le besoin urgent d'harmoniser les exigences pour les CoFC, notamment en termes de performances de filtration et de confort associées au port du masque. L'idée principale était de permettre aux industriels, mais aussi au grand public de fabriquer et de distribuer de tels dispositifs répondant à une caractérisation spécifique, notamment en termes d'efficacité de filtration et de perméabilité à l'air. En lien avec le guide de l'Afnor (Afnor, 2020), le Comité européen de normalisation (CEN) a, à son tour, élaboré un guide de fabrication et un protocole d'essai harmonisé en accord avec des laboratoires publics et privés impliqués dans de tels essais (CEN, 2020, annexe D). Le cahier des charges a été déterminé afin de permettre à des acteurs généralement non spécialistes des processus de filtration de concevoir et de produire des masques. Une spécification technique est par ailleurs en cours de construction avec l'objectif de faire évoluer ce document pour en faire une future norme européenne. Notons que des tutoriels « Do-It-Yourself » (DIY) ont également été largement diffusés sur les réseaux sociaux pendant toute l'année 2020 portant sur la réalisation de masques à partir de matériaux tissés, non tissés ou d'un mélange des deux, mais sans aucune considération pour leurs performances réelles en termes de filtration.

Ainsi, en lien avec les demandes des pouvoirs publics formulées pendant le premier confinement de 2020 et jusqu'à aujourd'hui, le LNE a été mobilisé afin de répondre à la question centrale des performances des masques FFPx, chirurgicaux, barrières et grand public, en s'appuyant sur son expertise en métrologie des aérosols. Pour ce faire, une plateforme de moyens d'essais a été développée pour tester différentes performances (filtration, respirabilité, mécanique). Cette plateforme est notamment constituée de bancs dédiés à l'évalua-

tion de l'efficacité de filtration des masques de protection. Tout en étant associé à des projets de recherche, ce nouveau moyen d'essai permet depuis le début de la crise sanitaire d'accompagner les pouvoirs publics, les industriels et les importateurs dans la qualification des masques FFP2, chirurgicaux, barrières et grand public. Par ailleurs, le LNE a également développé la certification « Masques de protection » pour apporter des garanties au regard de leurs performances.

Après cette brève description des différents types de masques en lien avec le contexte normatif, nous allons présenter plus spécifiquement le banc expérimental développé par le LNE pour réaliser les mesures de l'efficacité de filtration des CoFC (masques barrières et grand public), ainsi que les différentes comparaisons inter-laboratoires organisées dans ce cadre. Des axes d'amélioration des documents normatifs sont également proposés en termes de perspectives.

## Contexte associé à la mesure de l'efficacité de filtration des masques

### La mesure de l'efficacité de filtration

Concernant les performances des masques, l'efficacité de filtration est déterminée en réalisant des mesures portant sur les concentrations particulières en nombre de l'aérosol généré en amont et en aval du média filtrant constituant le masque. L'efficacité de filtration est alors calculée de la façon suivante :

$$E(\%) = \frac{C_{\text{amont}} - C_{\text{aval}}}{C_{\text{amont}}} \times 100$$

où,  $C_{\text{amont}}$  et  $C_{\text{aval}}$  correspondent aux concentrations particulières en nombre mesurées respectivement en amont et en aval du masque.

Il est important de préciser ici la notion de vitesse de filtration (en cm/s) associée à ces mesures d'efficacité, qui se définit comme le débit d'aérosol (en L/min) à travers une surface effective de filtration (en  $\text{cm}^2$ ). Le choix de cette vitesse de filtration est primordial ; il doit absolument être précisé étant donné son impact sur les efficacités de filtration, pouvant ainsi conduire à une sur ou à une sous-estimation de ces mesures. En effet, une augmentation de cette vitesse induit une augmentation de l'efficacité de filtration des particules microniques, mais une diminution de l'efficacité de filtration des particules submicroniques et nanométriques.

### Les différents types de masques

Le Tableau 1 de la page suivante présente les différents types de masques et le contexte normatif associé. Dans les paragraphes suivants, nous nous intéresserons plus spécifiquement à chacun d'eux.

#### Les masques FFPx

Les masques de types FFPx sont des équipements de protection individuelle qui doivent répondre aux exigences du règlement (UE) 2016/425 du 9 mars 2016 et à celles associées aux normes EN 149:2001+A1:2009 et EN 13274-7:2019 ou aux normes étrangères recon-




	Masques FFP2	Masques à usage médical (chirurgicaux)	CoFC : masques barrières et grand public
Illustration			
Contexte normatif	<p>Europe : EN 149:2001+A1:2009 et EN 13274-7:2019</p> <p>Chine : GB 2626-2006, GB 2626-2019/KP95 et KN95, GB/T 32610-2016/classe A</p> <p>États-Unis : NIOSH 42 CFR 84/KN95, P95 et R95</p> <p>Australie et Nouvelle-Zélande : AS/NZS 1716:2012/P2</p> <p>Corée : KMOEL-2017-64/1e classe</p> <p>Japon : JMHLW-Notification 214, 2018/DS2 et DL2</p> <p>Brésil : ABNT/NBR13698:2011/PFF2</p> <p>Mexique : NOM-116-2009/KN95, P95 et R95</p>	<p>Europe : EN 14683 :2019 (types I, II et IIR)</p> <p>États-Unis : ASTM F2100-19 (Level 1, 2, 3)</p> <p>Chine : YY 0969-2013, YY 0469-2011 (type I)</p>	<p>France : SPEC Afnor S76-001</p> <p>Europe : CWA 17553:2020 en lien avec EN 13274-7, EN 14683, EN ISO 16890-2 et EN ISO 21083-1</p> <p>CEN/TS 17553 en cours d'élaboration</p> <p>États-Unis : F2299/F2299M-03</p> <p>Italie : UNI PdR 90.1 2020, UNI PdR 90.2 2020</p>

Tableau 1 : Les différents types de masques et le contexte normatif associé.

nues comme équivalentes (voir le Tableau 1 ci-dessus). Ces dispositifs sont conçus pour assurer une étanchéité suffisante par rapport à l'atmosphère ambiante au niveau du visage du porteur. Ce type de masques protège ainsi le porteur contre l'inhalation de particules en suspension dans l'air susceptibles de contenir des agents infectieux. Notons que le port de ce type de masques est assez contraignant en termes d'inconfort thermique et de résistance respiratoire.

Il faut alors considérer plusieurs types de masques FFPx avec des valeurs de x égales à 1, 2 ou 3 et correspondant à des efficacités de filtration minimales de 80, 94 et 99 % respectivement pour les diamètres médians des aérosols d'essais. Ces masques sont réservés en priorité aux professionnels de santé. En accord avec les normes EN 149:2001+A1:2009 et EN 13274-7:2019, les mesures de l'efficacité de filtration sont réalisées en générant des aérosols de NaCl et d'huile de paraffine ayant une granulométrie spécifique (pour le NaCl, le diamètre médian de la distribution granulométrique est compris entre 0,06 et 0,10  $\mu\text{m}$ , avec une concentration massique comprise entre 4 et 12  $\text{mg}/\text{m}^3$  ; pour l'huile de paraffine, le diamètre médian de la distribution granulométrique est compris entre 0,29 et 0,45  $\mu\text{m}$ , avec une concentration massique comprise entre 15 et 25  $\text{mg}/\text{m}^3$ ). La détermination expérimentale de l'efficacité de filtration doit être réalisée pour un débit d'air de 95 L/min passant à travers le masque, et ce grâce à des

mesures de concentration massique obtenues par photométrie de flamme pour l'aérosol de NaCl et avec un compteur optique reposant sur la diffusion de la lumière pour l'aérosol d'huile de paraffine.

#### Les masques à usage médical (masques chirurgicaux)

Les masques chirurgicaux sont des dispositifs médicaux qui doivent répondre aux exigences de la directive 3/42/CEE du 14 juin 1993 et à celles associées à la norme européenne EN 14683:2019 ou aux normes étrangères reconnues comme équivalentes (voir le Tableau 1 ci-dessus). Ce type de masques réduit la contamination de l'environnement extérieur et des autres personnes en limitant la projection de gouttelettes émises par le porteur du masque. Ces dispositifs ne sont donc pas conçus pour protéger de l'inhalation de particules en suspension dans l'air.

Ces masques sont classés en deux types (I et II) correspondant à l'efficacité de filtration bactérienne (EFB) en intégrant également une subdivision supplémentaire pour le type II avec l'utilisation de la lettre « R » (IIR), pour les classer en fonction de leur résistance aux projections. En accord avec la norme EN 14683:2019, les mesures d'EFB sont réalisées grâce à l'utilisation d'un impacteur en cascade couplé à la génération d'un aérosol biologique de *Staphylococcus aureus* présentant une taille moyenne de  $3,0 \pm 0,3 \mu\text{m}$ , avec un

débit de 28,3 L/min et portant sur une surface d'essai supérieure à 49 cm<sup>2</sup>. Ainsi, ces masques doivent être conformes à des valeurs minimales d'EFB, à savoir des valeurs supérieures ou égales à 95 % pour le type I et à 98 % pour les types II et IIR. Notons que les masques de type I sont dédiés aux patients et autres personnes non professionnelles de santé afin de réduire le risque de propagation des infections, en particulier dans un contexte d'épidémie ou de pandémie. Contrairement aux masques de type II, ils ne sont pas destinés aux professionnels de santé, notamment ceux intervenant au sein des blocs opératoires.

### Les masques barrières

En lien avec le contexte sanitaire lié à la Covid-19, les pouvoirs publics ont créé un cadre favorisant la conception et la réalisation de masques dédiés à des usages non sanitaires. Le document Afnor SPEC (Afnor, 2020) indique les éléments essentiels encadrant leur fabrication et leur utilisation. Le dispositif « Masques barrières », qui complète les gestes barrières et les règles de distanciation physique, est destiné au public pour réaliser une activité quotidienne ou professionnelle. Il ne s'adresse pas aux patients contaminés, ni au personnel de santé. Ce dispositif n'est donc ni un dispositif médical ni un équipement de protection individuelle. Par rapport au guide Afnor SPEC disponible en France (2020), le Comité européen de normalisation (CEN) a élaboré à son niveau un guide de fabrication de ces masques et un protocole d'essai harmonisé en lien avec des laboratoires publics et privés, pour mener les essais de caractérisation (CEN CWA 17553, 2020, annexe D). En ce qui concerne les mesures de l'efficacité de filtration, différents types d'aérosols peuvent être impliqués, tels que le NaCl, le Talc, la poudre Holi (farine de maïs), la Dolomite ou le PolyStyrène Latex. Le diamètre particulaire considéré pour réaliser ces mesures est fixé à  $3,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$  avec une vitesse de filtration de  $6 \pm 1 \text{ cm/s}$  déterminée en lien avec le débit d'air associé à la respiration humaine et à la surface de filtration effective. Dans ces conditions, et pour obtenir la validation des performances de ces masques, l'efficacité de filtration doit atteindre une valeur minimale de 70 ou 90 %, déterminant le classement de ces masques en deux catégories. Il est important de mentionner qu'un projet de spécification technique est en cours d'élaboration au niveau européen (CEN) avec l'objectif de faire évoluer ce document pour en faire une future norme.

### Les masques « grand public »

Les masques « grand public » sont principalement utilisés par des individus dans le cadre de leurs activités professionnelles, mais aussi par la population en général. Ce type de masques a été proposé dans le cadre de la lutte contre l'épidémie. Ces dispositifs doivent répondre aux spécifications techniques définies à l'annexe I de la note interministérielle mise à jour le 28 janvier 2021. En lien avec les avis de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé du 24 mars 2020 (révisé le 29 janvier 2021) (ANSM, 2020a) et du 25 mars 2020 (révisé le 2 novembre 2020) (ANSM, 2020b) précisant le protocole de traitement permettant une réutilisation des masques considérés et l'avis du

Haut Conseil de la santé publique du 18 janvier 2021 (HCSP, 2021), une catégorie 1 pour ces masques a été définie comme ayant une efficacité de filtration supérieure à 90 % pour un diamètre des particules de 3  $\mu\text{m}$ . Cette catégorie est exclusivement réservée à des usages non sanitaires visant à prévenir les projections de gouttelettes émises par le porteur du masque. Ce dispositif représente une mesure complémentaire à l'application des mesures de distanciation physique et des gestes barrières. Il s'agit de masques textiles, qui sont la plupart du temps lavables et réutilisables. Les mesures d'efficacité de filtration doivent être réalisées en accord avec le protocole d'essai décrit dans le document DGA du 3 avril 2020 (DGA, 2020) ou un protocole équivalent. Elles concernent des particules dont la taille est de 3  $\mu\text{m}$ . L'usage des masques de catégorie 2 (efficacité de filtration supérieure à 70 %), tel que défini par la note d'information du 29 mars 2020, n'est plus recommandé en application du décret n°2021-76 du 27 janvier 2021, lequel s'appuie sur l'avis du Haut Conseil de la santé publique (HCSP, 2021) en date du 18 janvier 2021. Cette catégorie de masques n'a plus été considérée à partir du 28 janvier 2021 comme un dispositif de protection efficace pour faire face à l'épidémie liée à la Covid-19 dans le cadre de l'état d'urgence sanitaire.

## Banc expérimental de mesure de l'efficacité de filtration des masques barrières et grand public mis en place au LNE

### Description

Dans le contexte précité, plusieurs bancs d'évaluation de l'efficacité de filtration des masques ont été conçus au LNE, dont un banc expérimental associé aux masques barrières et aux masques grand public conformément au guide Afnor SPEC (Afnor, 2020) (voir la Figure 1 ci-après).

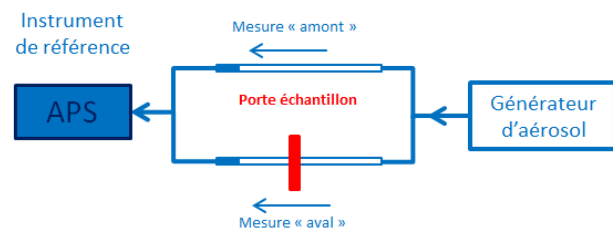


Figure 1 : Banc expérimental du LNE dédié aux mesures de l'efficacité de filtration des masques barrières et des masques grand public.

Ce banc d'essai se compose d'un porte-échantillon pour masques barrières, grand public ou chirurgicaux. Il est couplé à un système de génération en phase aérosol et à une instrumentation de référence permettant la mesure des distributions granulométriques en nombre des particules en amont et en aval de chaque matériau composant le masque en vue de déterminer

respectivement les concentrations en nombre pour un diamètre aérodynamique de  $3,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$ .

Concernant l'aérosol d'essai, un aérosol de latex de polystyrène (PSL) de  $3,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$  est généré grâce à un nébuliseur AGK2000 (commercialisé par la société PALAS). Afin de limiter la contribution particulaire associée à la nébulisation de l'eau MilliQ, un système de chauffage fixé à la sortie du nébuliseur est couplé à un système de séchage par diffusion contenant du silica gel. Le masque à tester est introduit dans un porte-échantillon, également appelé porte-filtre. Ce dernier présente un diamètre de 47 mm avec une surface de filtration effective de  $10,7 \text{ cm}^2$ . Entre le générateur d'aérosol et le porte-échantillon, un système de découplage de tuyaux en silicone conducteur permet de réaliser les mesures « amont/aval » grâce à un unique analyseur.

Ces mesures ont été effectuées grâce à un spectromètre aérodynamique (APS, commercialisé par la société TSI). L'APS est un instrument optique permettant de caractériser la granulométrie en nombre de particules en phase aérosol dans une gamme de mesures allant de  $0,5$  à  $20 \mu\text{m}$ . Cet instrument repose sur une technique de mesure du temps de vol des particules entre deux faisceaux lasers, ce qui permet d'obtenir en temps réel le diamètre aérodynamique associé à une concentration en nombre. Le débit d'aérosol pour ces mesures amont/aval a été fixé à  $3,85 \text{ L/min}$ , ce qui correspond à une vitesse de filtration de  $6 \text{ cm/s}$  pour une surface de filtration effective, comme précisé précédemment, de  $10,7 \text{ cm}^2$ .

## Comparaisons interlaboratoires (CIL)

### CIL associée aux masques barrières et aux masques grand public

En lien avec les bancs expérimentaux développés au LNE pour caractériser les performances des masques barrières et des masques grand public en termes d'efficacité de filtration, une comparaison interlaboratoire (CIL) a été organisée par l'IRSN, en y associant le LRGP (à Nancy) et le LNE (à Paris) (Bourrous *et al.*, 2021). L'influence potentielle du type d'aérosol (selon sa nature, sa composition), ainsi que celles de la conception des bancs d'essai et des protocoles de mesure ont été étudiées afin de quantifier les écarts entre les résultats obtenus par ces laboratoires. Pour l'ensemble des bancs d'essai, l'étude était basée sur la dispersion pneumatique de solutions aqueuses par nébulisation. En ce qui concerne le type d'aérosol, des particules liquides de diethyl sebacate (DEHS) et solides de NaCl et PSL ont été impliquées.

Deux stratégies de mesure ont été retenues, à savoir : une première basée sur une conduite principale avec des prélèvements d'aérosols en amont et en aval d'un porte-filtre contenant l'échantillon à tester ; et une seconde basée sur deux conduites montées en parallèle et deux porte-filtres identiques, dont un contenant l'échantillon à tester tandis que le second était vide. Des cycles de mesure significativement différents ont été pris en compte pour couvrir une large gamme de conditions d'essais. Pour chaque banc, les vitesses de filtration ont été considérées par chaque laboratoire

en accord avec le document CEN CWA (CEN, 2020, annexe D), soit des vitesses de  $6 \pm 1 \text{ cm/s}$ . Dix médias filtrants tissés recouvrant une large gamme d'efficacités de filtration (allant de 20 à 97 %) ont été utilisés pour cette comparaison interlaboratoire. Le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) a été désigné comme laboratoire de référence pour cette étude en lien avec la génération d'aérosol de PSL monodispersée présentant une taille certifiée à  $3 \mu\text{m}$ , et l'évaluation des incertitudes de mesure réalisée selon la loi de propagation décrite au sein du guide *ad hoc* (GUM, 2020).

Cette CIL a permis d'obtenir une comparabilité des résultats d'efficacité de filtration des aérosols de taille de  $3 \mu\text{m}$ , avec un écart inférieur à 27 %. Cela a été obtenu pour les trois bancs expérimentaux des laboratoires participants et impliquant les trois types d'aérosols précités. La stabilité de la concentration en nombre, les dispositifs de prélèvement et les efficacités de comptage des spectromètres impliqués (Armendariz et Leith, 2002 ; Volckens et Peters, 2005) sont identifiés comme des sources majoritaires de dispersion expérimentale. Cette CIL (Bourrous *et al.*, 2021) a ainsi mis en évidence la pertinence des bancs d'essai et des protocoles de mesure utilisés par chaque participant.

### CIL associée aux masques chirurgicaux

Toujours en lien avec le banc expérimental développé au LNE pour caractériser les performances des masques barrières et grand public en termes d'efficacité de filtration, une CIL a été menée pour les masques chirurgicaux. Cette CIL organisée par le LNE Paris a associé le LRGP de Nancy, l'École des Mines de Saint-Étienne et le laboratoire belge HEX. L'objectif de cette étude était, pour un média donné, de comparer entre eux les résultats obtenus en termes d'efficacité de filtration particulaire (PFE) et d'EFB (voir le paragraphe précédent consacré aux masques à usage médical). Pour ce faire, une vitesse de filtration homogène de  $10,1 \text{ cm/s}$  a été retenue par l'ensemble des participants en accord avec le contexte normatif (EN 14683:2019, débit de  $28,3 \text{ L/min}$  et surface effective de filtration de  $46,5 \text{ cm}^2$ ). Il ressort de cette étude une bonne homogénéité des mesures de PFE, mais des écarts importants pour les mesures d'EFB. Une plus grande dispersion des résultats de l'efficacité de filtration a également été observée pour des médias ayant des EFB non conformes. Une publication est en cours de préparation concernant les résultats de cette CIL (Fouqueau *et al.*, 2022).

## Conclusion et perspectives

Le développement de l'activité associée aux mesures de l'efficacité de filtration des masques de protection a permis au LNE de tester plusieurs centaines de références pendant les premières semaines de la crise sanitaire liée à la Covid-19.

Une nouvelle CIL a été initiée par le LNE en 2021 se basant sur les différentes méthodes appliquées par les différents laboratoires d'essais participants pour caractériser les efficacités de filtration des masques barrières et grand public. En s'appuyant sur les référentiels des comparaisons interlaboratoires NF ISO 5725, NF ISO

17043 et NF ISO 13528, le LNE proposera ultérieurement différentes exploitations graphiques de cette CIL, ainsi que des indicateurs statistiques de performance. Cette CIL se déroule en deux étapes : tout d'abord, a été conduite en 2021 une première série d'essais pour laquelle les participants ont été invités à réaliser leurs mesures en appliquant leur propre méthode sans modification des paramètres fixés en routine ; puis une deuxième série d'essais sera réalisée en 2022 sur la base d'un protocole en cours d'élaboration, lequel imposera notamment une vitesse de filtration égale à  $6 \pm 1$  cm/s. Les échantillons à tester sont fournis par le LNE à des dimensions conformes à celles exigées par les bancs de test de chaque partenaire, cela afin de s'affranchir de l'effet de la préparation de ces échantillons sur les mesures. Chaque participant recevra alors huit références se composant chacune de cinq échantillons à tester dans des conditions de répétabilité (même méthode, même opérateur, même environnement et dans un court laps de temps).

En termes de perspectives, notamment sur le plan du contexte normatif, des axes d'amélioration pourraient être proposés afin de réviser les normes européennes associées aux masques FFPx et chirurgicaux. En effet, pour les masques FFPx, la norme EN149:2001 impose un débit de 95 L/min, mais sans jamais y associer une vitesse de filtration, ni même préciser la surface de filtration à retenir. Par ailleurs, si des mesures de concentrations massiques à réaliser notamment en recourant à un photomètre de flamme sont exigées dans le cadre des normes EN 149:2001 et EN 13274-7:2019, il apparaît cependant plus pertinent de caractériser les pénétrations/efficacités de filtration en termes de concentrations en nombre, plutôt qu'en termes de masse. Un compteur à noyaux de condensation (CNC), qui permet de telles mesures, serait ainsi plus pertinent en termes de moyen instrumental pour ces documents normatifs. De plus, il serait nécessaire de considérer l'état de charge des aérosols impliqués dans ces essais lequel est susceptible d'impliquer des écarts dans la mesure de l'efficacité de filtration.

Concernant le contexte normatif associé aux masques chirurgicaux (EN 14683:2019), il faut préciser que l'utilisation d'un bio-aérosol peut susciter de nombreuses interrogations, notamment en ce qui concerne les risques de perte de bactéries. En d'autres termes, comment vérifier que les bactéries non détectées en aval du média filtrant seraient quand même passées à travers ce filtre, mais en ayant subi une dégradation qui rendrait impossible leur détection ? Par ailleurs, la norme EN 14683 préconise l'utilisation d'un nébuliseur pouvant diffuser des particules d'une taille moyenne de  $3,0 \pm 0,3$   $\mu\text{m}$ . Cependant, un tel processus de nébulisation est caractérisé par la génération d'un aérosol polydispersé présentant une large distribution granulométrique en nombre et ne correspondant pas à la taille moyenne précitée. De plus, il faut noter que l'EFB est calculée globalement à partir d'un comptage d'unités formant colonies (UFC), lesquelles sont obtenues sur l'ensemble des étages d'un impacteur en cascade et correspondant à une large gamme de diamètres de coupure particulières, sans être spécifiques à l'étage

correspondant à la « taille moyenne de 3  $\mu\text{m}$  ». De même, aucune vitesse de filtration n'est précisée dans cette norme, pas plus que le volume d'échantillons à générer et le temps de génération. En revanche, ce même document précise un conditionnement, en amont des essais, des médias à tester en termes de température et d'humidité relative. Mais, compte tenu de la saturation en eau très rapide observée dès la première minute des essais portant sur le média conditionné, cette étape de conditionnement n'apparaît pas vraiment nécessaire. Globalement, il est légitime de se poser la question d'opérer une caractérisation de ces dispositifs médicaux plutôt en termes de PFE qu'en termes d'EFB (Whyte *et al.*, 2022).

Pour finir, nous précisons que le contexte normatif s'appliquant à l'évaluation des masques barrières et des masques grand public est lacunaire. En effet, aucune norme n'est à ce jour publiée, seuls des guides l'ont été. De plus, l'implication forte de la communauté scientifique en métrologie des aérosols dans l'élaboration des documents Afnor SPEC (Afnor, 2020) et CEN (2020) explique pourquoi un grand nombre de précisions techniques y soient spécifiées, notamment en ce qui concerne la vitesse de filtration, mais sans toutefois aller jusqu'à imposer des contraintes au regard des moyens d'essai nécessaires au montage des bancs expérimentaux au sein des laboratoires et instituts. Une spécification technique actuellement en cours d'élaboration au niveau du CEN permettra ainsi de proposer un protocole harmonisé pour tester ces deux types de masques à l'échelle européenne.

## Références bibliographiques

- AFNOR (2020), « Afnor Spec S76-001 – Masques barrières », <https://masques-barrieres.afnor.org/>
- ANSM (2020a), avis du 24 mars 2020 portant sur la place de masques alternatifs en tissus dans le contexte de l'épidémie à Covid-19, [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/avis\\_anism\\_du\\_24\\_mars\\_2020\\_revise\\_29janvier\\_2021.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/avis_anism_du_24_mars_2020_revise_29janvier_2021.pdf)
- ANSM (2020b), avis du 25 mars 2020 précisant le protocole de traitement permettant une réutilisation des masques en tissu à usage non sanitaire prévus dans le cadre de l'épidémie Covid, [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/20201127\\_avis\\_anism\\_protocole\\_nettoyage\\_masquesv4-1.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/20201127_avis_anism_protocole_nettoyage_masquesv4-1.pdf)
- ARMENDARIZ A. J. & LEITH D. (2002), "Concentration measurement and counting efficiency for the aerodynamic particle sizer 3320", *J. Aerosol Sci.* 33, pp. 133-148, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(01\)00152-5](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(01)00152-5)
- ASADI S., WEXLER A. S., CAPPALÀ C. D., BARREDA S., BOUVIER N. M. & RISTENPART W. D. (2019), "Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness", *Sci. Rep.* 9, 2348, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
- ASADI S., BOUVIER N., WEXLER A. S. & RISTENPART W. D. (2020), "The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles?", *Aerosol Sci. Technol.* 54, pp. 635-638, <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1749229>
- BOURROUS S., BARRAULT M., MOCHO V., POIRIER S., BARDIN-MONNIER N., CHARVET A., THOMAS D., BESCOND A., FOUQUEAU A., MACÉ T., GAIE-LEVREL F.

- & OUF F.-X. (2021), "A performance evaluation and inter-laboratory comparison of community face coverings in the context of COVID-19 pandemic", *Aerosol and Air Quality Research*, <https://doi.org/10.4209/aaqr.200615>
- CEN CWA 17553 (2020), CEN workshop agreement: Community face coverings – Guide to minimum requirements, methods of testing and use, [ftp://ftp.cencenelec.eu/EN/ResearchInnovation/CWA/CWA17553\\_2020.pdf](ftp://ftp.cencenelec.eu/EN/ResearchInnovation/CWA/CWA17553_2020.pdf)
- CHARVET A., BARDIN-MONNIER N., THOMAS D., DUFAUD O., PFRIMMER M., BARRAULT M., BOURROUS S., MOCHO V., OUF F.-X., POIRIER S., JEANMICHEL L., SEGOVIA C., FERRY D. & GRAUBY O. (2022), "Impact of washing cycles on the performances of face masks", *Journal of Aerosol Science* 160, Elsevier, pp. 105-914, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105914>
- CLAPP P. W., SICKBERT-BENNETT E. E., SAMET J. M., BERNTSEN J., ZEMAN K. L., ANDERSON D. J., WEBER D. J. & BENNETT W. D. (2020), "Evaluation of Cloth masks and modified procedure masks as personal protective equipment for the public during the COVID-19 pandemic", *JAMA Intern. Med.* 181, pp. 463-469, <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.8168>
- DGA (2020), Lettre n°4 à l'attention des industriels sollicitant DGA Maîtrise NRBC pour les masques, <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/protocoledga.pdf>
- FARIDI S., NIAZI S., SADEGHI K., NADDAFI K., YAVARIAN J., SHAMSIPOUR M., JANDAGHI N. Z. S., SADEGHNIAT K., NABIZADEH R., YUNESIAN M., MOMENIHA F., MOKAMEL A., HASSANVAND M. S. & MOKHTARIAZAD T. (2020), "A field indoor air measurement of SARS-CoV-2 in the patient rooms of the largest hospital in Iran", *Sci. Total Environ.* 725, 138401, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138401>
- FOUQUEAU A., POURCHEZ J., LECLERC L., PEYRON A., MONTIGAUD Y., VERHOEVEN P., BESCOND A., MACÉ T., THOMAS D., CHARVET A., BOURROUS S., GHIJSELINGS M., HARS P., POLYN F. & GAIE-LEVREL F. (2022), *An inter-laboratory comparison between particle and bacterial filtration efficiencies of surgical masks in the COVID-19 pandemic context*, à soumettre à *Aerosol and Air Quality Research*.
- GUM (2020), JCGM GUM-6 (2020), « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure – Partie 6 : élaboration et utilisation des modèles de mesure », [https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM\\_GUM\\_6\\_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337](https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337)
- GRALTON J., TOVEY E., MCLAWS M. L. & RAWLINSON W. D. (2011), "The role of particle size in aerosolised pathogen transmission", *A review. J. Infect.* 62, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2010.11.010>
- HCSP (2021), Avis relatif aux mesures de contrôle et de prévention de la diffusion des nouveaux variants du Sars-CoV-2, [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/avis\\_hcsp-nouveaux\\_variants-covid-19\\_du\\_18\\_janvier\\_2021.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/avis_hcsp-nouveaux_variants-covid-19_du_18_janvier_2021.pdf)
- HCSP (2020), Avis relatif au Coronavirus Sars-CoV-2 : risque de transmission du virus sous la forme d'aérosols en milieu intérieur et extérieur, <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=808>
- JI Y., QIAN H., YE J. & ZHENG X. (2018), "The impact of ambient humidity on the evaporation and dispersion of exhaled breathing droplets: A numerical investigation", *Journal of Aerosol Science* 115, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.10.009>
- JOHNSON G. R., MORAWSKA L., RISTOVSKI Z. D., HARGREAVES M., MENGERSEN K., CHAO C. Y. H., WAN M. P., LI Y., XIE X., KATOSHEVSKI D. & CORBETT S. (2011), "Modality of human expired aerosol size distributions", *J. Aerosol Sci.* 42, pp. 839-851, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.07.009>
- KIM J. M., CHUNG Y. S., JO H. J., LEE N. J., KIM M. S., WOO S. H., PARK S., KIM J. W., KIM H. M. & HAN M. G. (2020), "Identification of Coronavirus Isolated from a Patient in Korea with COVID-19", *Osong Public Health Res. Perspect.* 11, pp. 3-7, <https://doi.org/10.24171/j.phrp.2020.11.1.02>
- KONDA A., PRAKASH A., MOSS G. A., SCHMOLDT M., GRANT G. D. & GUHA S. (2020), "Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks", *ACS Nano* 14, pp. 6339-6347, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03252>
- LEE J., YOO D., RYU S., HAM S., LEE K., YEO M., MIN K. & YOON C. (2019), "Quantity, size distribution, and characteristics of cough-generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection", *Aerosol and Air Quality Research* 19, pp. 840-853, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.01.0031>
- LIANG M., GAO L., CHENG C., ZHOU Q., UY P. J. & HEINER K. (2020), "Efficacy of face mask in preventing respiratory virus transmission: A systematic review and meta-analysis", *Travel Medicine and Infectious Disease* 36, <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101751>. Article 101751
- LINDSLEY W. G., BLACHERE F. M., THEWLIS R. E., VISHNU A., DAVIS K. A., CAO G., PALMER J. E., CLARK K. E., FISHER M. A., KHAKOO R. & BEEZHOLD D. H. (2010), "Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs", *PLOS ONE* 5, e15100, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015100>
- LIU Y., NING Z., CHEN Y., GUO M., LIU Y., GALI N. K., SUN L., DUAN Y., CAI J., WESTERDAHL D., ENV D., LIU X., HO K. F., KAN H., FU Q. & LAN K. (2020), "Aerodynamic characteristics and RNA concentration of SARS-CoV-2 aerosol in Wuhan hospitals during Covid-19 outbreak", *bioRxiv* 2020.03.08.982637, <https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637>
- MATSUYAMA S., NAO N., SHIRATO K., KAWASE M., SAITO S., TAKAYAMA I., NAGATA N., SEKIZUKA T., KATOH H., KATO F., SAKATA M., TAHARA M., KUTSUNA S., OHMAGARI N., KURODA M., SUZUKI T., KAGEYAMA T. & TAKEDA M. (2020), "Enhanced isolation of SARS-CoV-2 by TMPRSS2-expressing cells", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117, pp. 7001-7003, <https://doi.org/10.1073/pnas.2002589117>
- MORAWSKA L., JOHNSON G. R., RISTOVSKI Z. D., HARGREAVES M., MENGERSEN K., CORBETT S., CHAO C. Y. H., LI Y. & KATOSHEVSKI D. (2009), "Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities", *J. Aerosol Sci.* 40, pp. 256-269, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002>
- Note d'information interministérielle du 29 mars 2020 (mise à jour le 28 janvier 2021), [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/masques\\_reservees\\_a\\_des\\_usages\\_non\\_sanitaires.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/covid-19/masques_reservees_a_des_usages_non_sanitaires.pdf)
- OMS (2020), *Covid-19: l'OMS confirme le risque d'une transmission aérienne du virus*, <https://www.un.org/fr/coronavirus/articles/risk-confirmed-of-aerial-virus-transmission>
- PAPINENI R. S. & ROSENTHAL F. S. (1997), "The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects", *J. Aerosol Med.* 10, pp. 105-116, <https://doi.org/10.1089/jam.1997.10.105>
- PARK W. B., KWON N. J., CHOI S. J., KANG C. K., CHOE P. G., KIM J. Y., YUN J., LEE G. W., SEONG M. W., KIM N. J., SEO J. S. & OH M. D. (2020), "Virus isolation from the first patient with SARS-CoV-2 in Korea", *J. Korean Med. Sci.* 35, pp. 10-14, <https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e84>
- PEI C., OU Q., KIM S. C., CHEN S. C. & PUI D. Y. H. (2020), "Alternative face masks made of common materials for general public: Fractional filtration efficiency and breathability perspective", *Aerosol Air Qual. Res.* 20, pp. 2581-2591, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0423>

- REN L. L., WANG Y. M., WU Z. Q., XIANG Z. C., GUO L., XU T., JIANG Y. Z., XIONG Y., LI Y. J., LI X. W., LI H., FAN G. H., GU X. Y., XIAO Y., GAO H., XU J. Y., YANG F., WANG X. M., WU C., CHEN L. *et al.* (2020), "Identification of a novel coronavirus causing severe pneumonia in human: a descriptive study", *Chin. Med. J.* 133, pp. 1015-1024, <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000722>
- SANTARPIA J. L., RIVERA D. N., HERRERA V. L., MORWITZER M. J., CREAGER H. M., SANTARPIA G. W., CROWN K. K., BRETT-MAJOR D. M., SCHNAUBELT E. R., BROADHURST M. J., LAWLER J. V., REID S. P. & LOWE J. J. (2020), "Aerosol and surface contamination of SARS-CoV-2 observed in quarantine and isolation care", *Sci. Rep.* 10, 12732, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69286-3>
- VAN DOREMALEN N., BUSHMAKER T., MORRIS D. H., HOLBROOK M. G., GAMBLE A., WILLIAMSON B. N., TAMIN A., HARCOURT J. L., THORNBURG N. J., GERBER S. I., LLOYD-SMITH J. O., DE WIT E. & MUNSTER V. J. (2020), "Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1", *N. Engl. J. Med.* 382, pp. 1564-1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- VOLCKENS J. & PETERS T. M. (2005), "Counting and particle transmission efficiency of the aerodynamic particle sizer", *J. Aerosol Sci.* 36, pp. 1400-1408, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.03.009>
- WHYTE H. E., MONTIGAUD Y., AUDOUX E. *et al.* (2022), "Comparison of bacterial filtration efficiency vs. particle filtration efficiency to assess the performance of non-medical face masks", *Sci. Rep.* 12, 1188, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05245-4>
- XIE X., LI Y., CHWANG A. T. Y., HO P. L. & SETO W. H. (2007), "How far droplets can move in indoor environments – Revisiting the Wells evaporation-falling curve", *Indoor Air* 17, pp. 211-225, <https://doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x>
- ZHAO M., LIAO L., XIAO W., YU X., WANG H., WANG Q., LIN Y. L., KILINC-BALCI F. S., PRICE A., CHU L., CHU M. C., CHU S. & CUI Y. (2020), "Household materials selection for homemade cloth face coverings and their filtration efficiency enhancement with triboelectric charging", *Nano Lett.* 20, pp. 5544-5552, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02211>