

CMRC-NRC

Procédure de mesure de catégorie recherche de l'efficacité de filtration des respirateurs N95 contre les particules

Greg J. Smallwood, Joel C. Corbin, Stéphanie Gagné,
Ian Leroux, Simon-Alexandre Lussier, Fengshan Liu,
Jalal Norooz Oliaee et Prem Lobo

Centre de recherche en métrologie
31 juillet 2020



National Research
Council Canada

Conseil national de
recherches Canada

Canada

© (2020) Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada.

Papier : N° de cat. : NR16-326/2020F
ISBN : 978-0-660-35712-6

PDF : N° de cat. : NR16-326/2020F-PDF
ISBN : 978-0-660-35711-9

Also available in English.

CNRC.CANADA.CA   

Résumé

Dans ce rapport, nous présentons les instruments, le matériel et les méthodes d'essai utilisés par le Centre de recherche en métrologie du CNRC pour mettre au point un système de mesure de catégorie recherche de l'efficacité de filtration des particules. Le rapport présente également les données acquises pour valider les performances du système aux plans de la portée, de la répétabilité, de la précision intermédiaire et de la linéarité.

Ce système a été conçu pour quantifier l'efficacité de filtration en fonction de la concentration exprimée en termes de nombre volumique et de la perte de charge (ou baisse de pression) au travers d'un masque ou d'autres milieux filtrants. Deux quantités essentielles sont présentées : 1) l'efficacité de filtration en fonction de la concentration de particules (η) et 2) la perte de charge (ΔP), couramment appelée *résistance*. Ces deux quantités rapportées sont traçables au Système international d'unités (SI).

Le système de mesure de l'efficacité de filtration des particules (SMEFP) du Centre de recherche en métrologie du CNRC est basé sur le protocole TEB-APR-STP-0059 du NIOSH et adapté pour permettre l'utilisation des compteurs de particules par condensation (CPC) et des granulomètres à balayage de mesure par mobilité (SMPS) de catégorie recherche pour mesurer l'efficacité initiale de filtration en fonction de la concentration de particules et d'autres caractéristiques de performance des masques candidats à la norme N95. Ce système peut aussi être adapté pour répondre à la norme ASTM F2299/F2100. Les principales caractéristiques du système sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Principales caractéristiques du Système de mesure de l'efficacité de filtration des particules (SMEFP) du Centre de recherche en métrologie du CNRC	
Spécification	Caractéristiques
Limitation sur la géométrie du masque	Aucune
Efficacité de filtration en fonction de la concentration de particules, η (%)	Deux CPC
Efficacité de filtration en fonction de la masse	Deux SMPS
Perte de charge (résistance) (Pa)	Deux jauges de pression barométrique
Efficacité de filtration en fonction de la taille	Deux SMPS
Source d'aérosol	Nébulisation de NaCl de 2 % (en masse) dans de l'eau désionisée ou de sphères de latex
Distribution granulométrique des particules en aérosol	Diamètre géométrique médian (DGM) de 75 ± 30 nm; écart-type géométrique (ETG) $< 1,86$; basé sur le diamètre de mobilité
Débit d'aérosol	Jusqu'à 85 ± 4 l _s /min (litre standard par minute)
Vitesse frontale	Jusqu'à 75 ± 4 cm/s

Table des matières

Liste des abréviations	8
Abréviation	8
Description	8
Liste des symboles.....	9
Symbole	9
Description	9
Unités	9
1 Contexte	10
1.1 La pandémie due au SARS-CoV-2 et le besoin de tester les masques N95.....	10
1.2 Virus en aérosol et filtration par masque.....	11
1.3 État actuel des connaissances sur les procédures d'essai les plus pertinentes.....	11
2 Méthode	14
2.1 Vue d'ensemble.....	14
2.2 Montage expérimental.....	15
2.2.1 Trajet de l'aérosol.....	15
2.3 Méthode d'essai	17
2.4 Méthode d'analyse	18
3 Validation de la méthode.....	19
3.1 Différences entre le SMEFP du CNRC et la méthode TEB-APR-STP-0059-508 du NIOSH	19
3.2 Traçabilité et contrôle des processus.....	20
3.2.1 Étalonnages	20
3.2.2 Assurance de la qualité des données et des analyses.....	21
3.3 Validation de la méthode	22
3.3.1 Démonstration des plages utilisables	22
3.3.2 Répétabilité	22
3.3.3 Précision intermédiaire	23
3.3.4 Linéarité	24
3.3.5 Durée de l'essai des masques N95 candidats.....	25
3.4 Vérification de la méthode	26

3.5 Efficacité de la filtration en fonction de la taille..... 27

4 Conclusions..... 29

5 Pour de plus amples renseignements..... 30

6 Références..... 31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répétabilité déterminée pour le SMEFP du CNRC.....	23
Tableau 2 : Précision intermédiaire déterminée pour le SMEFP du CNRC.....	24

Liste des figures

Figure 1. Schéma de montage utilisé pour les essais d'efficacité de filtration d'un masque N95.	15
Figure 2. Montage du masque N95 et chambre d'essai.	16
Figure 3 : Linéarité de la réponse des CPC en fonction de celle du CPC TSI 3788 étalonné.	21
Figure 4 : Illustration de la plage du SMEFP du CNRC, couvrant des taux d'efficacité de filtration d'un peu moins de 65 % à plus de 99 % et une perte de charge de 60 à 170 Pa, pour 1 masque N95 certifié et 26 masques N95 candidats provenant de 5 lots différents.	22
Figure 5 : Démonstration de la linéarité du SMEFP du CNRC.	25
Figure 6 : Démonstration de l'influence de la durée de l'essai du masque sur l'efficacité de filtration pour le SMEFP du CNRC.	26
Figure 7 : Illustration de l'efficacité de filtration en fonction de la taille d'après les données des SMPS pour deux échantillons représentatifs de masques.	28

Liste des abréviations

Abréviation	Description
ASPC	Agence de la santé publique du Canada
cm ³ /min	centimètre cube standard par minute
CPC	compteur de particules par condensation
DAMM	diamètre aérodynamique moyen en masse
DGM	diamètre géométrique moyen
EPI	équipement de protection individuelle
ETG	écart-type géométrique
filtre HEPA	filtre de particules à haute efficacité
HR	humidité relative
l/min	litres par minute
l _s /min	litre standard par minute
masque N95	couvre-visage qui filtre au moins 95 % des particules en suspension dans l'air
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
RDM	régulateur de débit massique
SI	Système international d'unités
SMPS	granulomètre à balayage de mesure par mobilité

Liste des symboles

Symbole	Description	Unités
η	Efficacité de filtration en fonction de la concentration de particules	%
ΔP	Perte de charge	Pa
$C_{\#,i}$	Concentration en particules, mesurée par le CPC i	part./cm ³
$C_{\#,i}^{Zéro}$	Concentration en particules dans l'air filtré, mesuré par le CPC i	part./cm ³
$C_{\#,i}^0$	Concentration en particules ajustée à la température et la pression normales ($T = 293$ K, $P = 101,325$ kPa), mesuré par le CPC i	part./cm ³
$C_{\#,i}^{Blanc}$	Concentration en particules en l'absence de filtration, mesuré par le CPC i	part./cm ³

1 Contexte

1.1 La pandémie due au SARS-CoV-2 et le besoin de tester les masques N95

La pandémie due au SARS-CoV-2 a entraîné une hausse spectaculaire de la demande d'équipements de protection individuelle (EPI), notamment les masques N95 utilisés pour protéger le personnel médical, les premiers intervenants et les autres travailleurs de première ligne contre l'inhalation de gouttelettes en suspension dans l'air, de petits résidus de gouttelettes ou d'autres particules d'aérosol susceptibles de contenir des agents pathogènes. Par ailleurs, la pandémie a perturbé la fabrication et la distribution de ces équipements par des sources établies. Cela a contraint les utilisateurs à envisager d'autres sources d'approvisionnement : les stocks périmés qui, dans les circonstances normales, seraient mis aux rebuts, les installations de fabrication nouvellement établies et sans antécédents ni certifications pour la production de ces masques ou encore les fournisseurs étrangers dont les produits peuvent être certifiés conformes à des normes nationales similaires, mais non équivalentes à celles d'autres pays. Plusieurs pays ont également signalé la vente de produits contrefaits et de qualité inférieure. Il est donc urgent d'évaluer la performance de ces masques N95 afin de déterminer quels produits et quels fournisseurs peuvent répondre aux besoins du Canada, tant du point de vue de l'efficacité de filtration que du point de vue de leur résistance (perte de charge).

La désignation N95 s'applique aux masques respiratoires qui filtrent au moins 95 % des particules en suspension dans l'air conformément aux procédures d'essai normalisées du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) des États-Unis (NIOSH, 2016). Au début de la pandémie due au SARS-CoV-2 en mars 2020, le Canada avait peu de capacités de fabrication, de test ou de certification des masques N95. Auparavant, les masques utilisés au Canada étaient obtenus auprès de fournisseurs étrangers dont les produits étaient déjà certifiés aux normes du NIOSH aux États-Unis et aucun test conforme au protocole du NIOSH n'était effectué au Canada. Anticipant le besoin de tester les produits des fabricants nationaux nouvellement établis et des fournisseurs adhérant à différentes normes de certification et d'essai, le Centre de recherche en métrologie du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) a développé et validé un système de catégorie recherche pour déterminer la résistance et l'efficacité de filtration des particules des masques N95.

Nous décrivons dans le présent rapport les instruments, le matériel et les méthodes d'essai utilisés ainsi que les leçons tirées de la mise au point du système de mesure de catégorie recherche de l'efficacité de filtration des particules au Centre de recherche en métrologie du CNRC, ci-après le SMEFP du CNRC. Ce système est conçu pour quantifier l'efficacité de filtration en fonction de la concentration de particules et de la perte de charge à travers un masque ou d'autres milieux filtrants. L'efficacité de filtration en fonction de la concentration en termes de masse volumique peut également être déduite de ce système, dont la démonstration dépasse le cadre du présent rapport.

1.2 Virus en aérosol et filtration par masque

La transmission de maladies par voie aérienne survient lorsque des particules sont produites par les liquides qui tapissent les voies respiratoires. Dans l'ordre croissant des taux d'émission de ces particules, mentionnons les activités respiratoires normales (respirer et parler), les activités respiratoires symptomatiques (toux et éternuement) et les procédures médicales génératrices d'aérosol telles que l'intubation (Jones et Brosseau 2015; Tellier et coll. 2019). En nombre, la majorité des particules émises ont un diamètre inférieur à un micromètre (μm) (Bake et coll. 2019; Papineni et Rosenthal 1997; Morawska et coll. 2008), bien que l'éternuement, la toux et les procédures médicales puissent également générer des gouttelettes plus grosses (Gratton et coll. 2011). Après l'émission, les gouttelettes respiratoires sèchent rapidement pour atteindre environ 30 % de leur diamètre initial (Redrow et coll. 2011). Ici, le terme « gouttelette » est utilisé pour désigner les particules respiratoires avant le séchage et le terme « particule » est utilisé pour désigner les particules respiratoires après le séchage. Certaines sources utilisent le terme « noyaux de gouttelettes » pour désigner les particules respiratoires séchées (Organisation mondiale de la santé, 2020).

On a démontré que les patients infectés par diverses maladies génèrent des particules infectieuses dans l'air par toutes les activités susmentionnées (respiration, parole, toux, éternuement) (Fennelly et coll. 2004; Lloyd-Smith et coll. 2005; Cowling et coll. 2013; Jones et Brosseau 2015; Yan et coll. 2018; Leung et coll. 2020). L'agent pathogène peut être d'une taille comparable aux particules émises, comme c'est le cas pour de nombreux agents pathogènes bactériens de taille micrométrique ou beaucoup plus petite (de l'ordre de $0,1 \mu\text{m}$ de diamètre) dans le cas de nombreux virus, y compris les virus de la grippe et les coronavirus. Par exemple, le SARS-CoV-1 (le virus qui a causé l'épidémie de SRAS en 2003-2004) a un diamètre de $0,078 \mu\text{m}$ (Goldsmith et coll. 2004). Le SARS-CoV-2 a une masse moléculaire similaire à celle du SARS-CoV-1 et donc un diamètre similaire. Comme le diamètre de ces coronavirus est inférieur au diamètre typique des particules respiratoires, les particules infectieuses doivent être considérées comme des bioaérosols de lipides, d'eau, de protéines et potentiellement de virus et de bactéries (avec des tailles typiques inférieures à $1 \mu\text{m}$ comme il est indiqué ci-dessus).

Toutes ces particules se trouvent dans la plage qu'un masque N95 devrait éliminer efficacement. Bien que la spécification N95 ait été conçue pour les industries de la fabrication et de la construction, la science fondamentale de la filtration des particules n'est pas très différente entre les particules industrielles et infectieuses (Radonovich et coll. 2009; Kulkarni, Baron et Willeke, 2011).

1.3 État actuel des connaissances sur les procédures d'essai les plus pertinentes

Les nanoparticules en suspension dans l'air peuvent être capturées lors de leur passage à travers un filtre lorsqu'elles entrent en contact avec le filtre par diffusion, impaction inertielle ou interception. L'interception se produit lorsqu'une particule, emportée par les courants gazeux, se trouve dans un rayon d'une particule du milieu de filtration. Ces trois processus peuvent être décrits en fonction de la taille d'une nanoparticule. En effet, la trajectoire des plus petites particules est significativement affectée par leur interaction avec les molécules de gaz, donc plus sujette à une marche aléatoire : elles subissent alors une diffusion. Les plus grosses particules sont mieux éliminées par impaction et interception dans un modèle où l'on décrit l'air comme un fluide continu. Par conséquent, la diffusion s'applique principalement aux plus petites particules

(diamètres inférieurs à $\sim 0,1 \mu\text{m}$) et l'impaction et l'interception aux plus grosses particules (diamètres supérieurs à $\sim 1 \mu\text{m}$) (Kulkarni, Baron et Willeke, 2011). Entre ces fourchettes de taille (de $0,15$ à $0,5 \mu\text{m}$), les particules sont généralement capturées par un mélange de ces mécanismes, mais avec une efficacité moindre, car elles n'obéissent efficacement à aucun des processus. Les forces électrostatiques, résultant soit de l'utilisation de matériaux portant une charge électrostatique, soit du dépôt accumulé de particules naturellement chargées, peuvent améliorer considérablement l'efficacité dans cette plage (Wang, 2001).

Les particules d'aérosol infectieuses peuvent être de tailles très variées, de sorte que tous les processus susmentionnés entrent en jeu lors de leur filtration (Gralton et coll. 2011). Il est important de noter que l'efficacité avec laquelle un agent pathogène donné est filtré, comme le SARS-CoV-2, ne dépend pas seulement du diamètre de l'agent pathogène lui-même, mais aussi de la quantité de matières supplémentaires également présentes dans la gouttelette respiratoire, par exemple des lipides, de l'eau et des protéines.

Afin de traiter un large éventail d'aérosols infectieux, la meilleure façon d'évaluer la performance d'un masque est d'utiliser des particules d'essai d'une taille qui est la plus susceptible d'être transmise à travers un matériau filtrant. Dans la norme TEB-APR-STP-0059-508 N95 du NIOSH, ce concept est pris en compte par l'utilisation de particules de chlorure de sodium (NaCl) ayant un diamètre géométrique moyen (DGM) de $0,075 \pm 0,020 \mu\text{m}$ et une distribution granulométrique log-normale avec un écart-type géométrique (ETG) inférieur à 1,86. Le Centre de recherche en métrologie du CNRC a modifié l'approche documentée par la norme N95 du NIOSH dans le but exprès de fournir des résultats d'essai fiables aux travailleurs de la santé, en utilisant des instruments de pointe pour mesurer les aérosols. Cette approche est présentée à la section 3.1 de ce document.

Paradoxalement, la même population de particules de NaCl peut être décrite par le DGM de $0,075 \pm 0,020 \mu\text{m}$, spécifié par le protocole du NIOSH, et par le diamètre aérodynamique médian en masse (DAMM) de $0,3 \mu\text{m}$, spécifié par le règlement 42 CFR 84 des États-Unis. Pour la même distribution granulométrique d'aérosol de NaCl, le DAMM est plus grand que le DGM, principalement parce que le DAMM représente le nombre de particules pondéré en fonction de la masse, alors que le DGM représente seulement le nombre de particules. Cependant, le DAMM est également plus grand parce qu'il reflète le diamètre aérodynamique, c.-à-d. le diamètre d'une particule dont la vitesse terminale correspond à celle d'une sphère équivalente en volume d'une masse volumique de 1000 kg m^{-3} , ce qui est lié à l'inertie et donc à la masse volumique des particules, contrairement au diamètre de mobilité, qui est le diamètre d'une particule dont la vitesse de migration est égale à celle d'une sphère équivalente en volume. On peut faire la conversion entre les valeurs DGM et DAMM en utilisant les définitions mathématiques du diamètre de mobilité, du diamètre aérodynamique, du DAMM et du DGM données par Hinds (1999). Il est nécessaire de prendre en compte la masse volumique du NaCl (2160 kg m^{-3}), l'augmentation de 1,1 fois déterminée expérimentalement de la résistance aérodynamique subie par les particules de NaCl produites en laboratoire (ce que l'on appelle le « facteur de forme »; Zieger et coll., 2018) et le fait que les nanoparticules ne subissent pas une résistance en régime continu, mais plutôt un « glissement » entre les molécules d'air (cette « correction de glissement de Cunningham » a été calculée à l'aide des données de Kim et coll., 2005). Il en résulte que, lorsqu'elles sont observées au microscope électronique, ces particules de NaCl auraient un diamètre physique médian de $0,071 \mu\text{m}$, mais la majeure partie de leur masse se déposerait sur les poumons selon un profil similaire à celui des gouttelettes d'eau de $0,3 \mu\text{m}$.

Il est a noté que la flexibilité qu'offre le SMEFP nous permet de pratiquer des méthodes de test alternatives, tel que la norme ASTM F2299/F2100, sans grand changement au système. La démonstration de l'équivalence à la norme ASTM F2299/F2100 du SMEFP sera présentée dans une publication future.

2 Méthode

2.1 Vue d'ensemble

La méthode décrite ci-dessous est utilisée pour obtenir deux quantités essentielles rapportées : 1) l'efficacité de filtration en fonction de la concentration de particules (η) et 2) la perte de charge (ΔP), souvent appelée résistance. Ces deux quantités rapportées sont traçables au SI. Pour obtenir ces quantités de manière fiable, la distribution granulométrique des particules, la concentration de particules, le débit, la pression et l'humidité relative sont mesurés en permanence.

Le protocole suivi avec le SMEFP du CNRC consiste en le calcul de la fraction de la concentration de particules de NaCl, en suspension dans l'air, qui se trouve transmise par un masque N95 candidat donné. Les mesures de concentration sont faites en utilisant deux compteurs de particules par condensation (CPC) en amont et en aval. Une particule, avec un DGM de $0,075 \pm 0,020 \mu\text{m}$, qui entre dans un CPC est exposée à une vapeur sursaturée (butanol ou eau, selon le modèle du CPC), ce qui entraîne la condensation de la vapeur sur la nanoparticule. Cette condensation fait croître la particule jusqu'à un diamètre suffisamment grand ($> 1 \mu\text{m}$) pour être facilement comptée par un photodétecteur dans une chambre optique. Le nombre de particules K_i , comptées dans un temps t (en minutes) à un débit Q_i (en cm^3/s) donne la concentration (particules par centimètre cube) mesurée par le CPC i :

$$C_i = \frac{K_i}{tQ_i} \quad (\text{équation 1})$$

Les conditions à zéro pour chaque CPC ($C_{\#1}^{Zéro}$ et $C_{\#2}^{Zéro}$) sont définies comme étant la concentration de particules obtenue après filtration. La filtration est atteinte en coupant le flux provenant de la source par la vanne d'arrêt. L'échantillonnage se fait donc uniquement sur des entrées d'air filtrées par filtre HEPA (voir la figure 1). Les conditions de référence des CPC ($C_{\#1}^{Blanc}$ et $C_{\#2}^{Blanc}$) ont été définies en faisant fonctionner le système sans masque en place, afin de quantifier les pertes par transmission de particules dans le système (entre le CPC1 en amont et le CPC2 en aval par rapport au masque N95 candidat testé). Les conditions de référence servent également à garantir que l'étalonnage des deux CPC soit cohérent et à normaliser toute différence systématique dans les valeurs K_i ou Q_i . L'efficacité de filtration finale est ensuite calculée d'après les mesures des CPC, comme suit :

$$\eta = \left(1 - \left(\frac{C_{\#2} - C_{\#2}^{Zéro}}{C_{\#1} - C_{\#1}^{Zéro}} \right) \left(\frac{C_{\#1}^{Blanc}}{C_{\#2}^{Blanc}} \right) \left(\frac{T_2}{P_2} \right) \left(\frac{P_1}{T_1} \right) \right) \times 100 \quad (\text{équation 2})$$

On peut déduire l'efficacité de filtration en fonction de la concentration en termes de masse volumique en remplaçant, dans l'équation 2, les concentrations en termes de nombre volumique $C_{\#}$ par les concentrations en termes de masse volumique C_m . Cette option est examinée plus en détail à la section 3.1 et sera traitée dans les travaux futurs.

2.2 Montage expérimental

La figure 1 est une représentation du SMEFP du CNRC pour tester l'efficacité de filtration des masques N95 candidats.

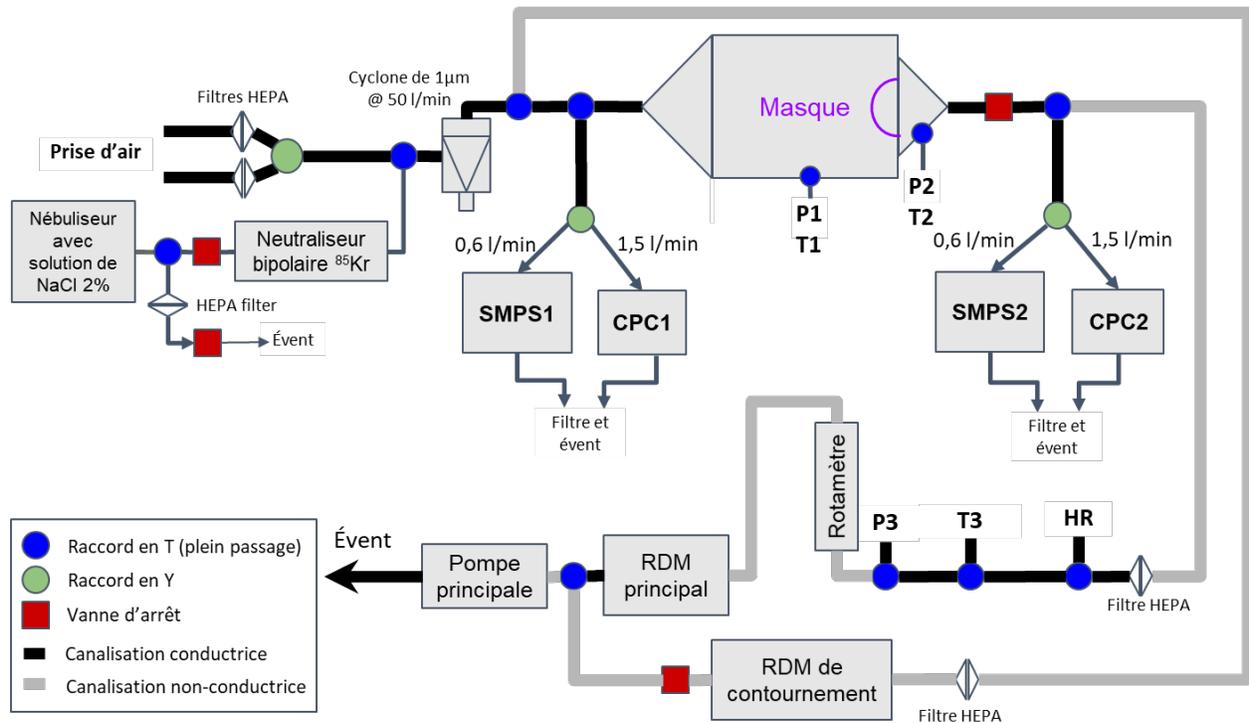


Figure 1. Schéma de montage utilisé pour les essais d'efficacité de filtration d'un masque N95.

2.2.1 Trajet de l'aérosol

Le nébuliseur génère un aérosol d'air et de particules de NaCl à partir d'une solution de 2 % en masse de NaCl dans de l'eau désionisée à un débit d'environ 2 l/min. L'aérosol traverse un chargeur bipolaire au ⁸⁵Kr (également connu sous le nom de neutraliseur) afin de conférer aux particules une charge électrique suivant une distribution de Boltzmann, ce qui permet d'atteindre l'équilibre des charges (Kulkarni, Willeke et Baron, 2011). L'excès d'aérosol généré est évacué dans la pièce à travers un filtre HEPA. Le flux d'aérosol est généré par la pompe principale qui aspire l'air filtré à travers le système d'essai. La branche supérieure « prise d'air pour zéro » est utilisée pour diluer l'aérosol généré ainsi que pour satisfaire aux exigences de débit de 85 ± 4 l/min. Pour l'essai sans particule (à concentration zéro), l'air ambiant filtré est échantillonné par le chemin parallèle. La température et l'humidité relative sont respectivement maintenues à 25 ± 5 °C et à 30 ± 20 % HR.

Une fois que l'aérosol est à l'équilibre des charges, il passe à travers un cyclone, qui est utilisé pour éliminer les grosses particules (> 1 µm), ce qui empêche la contamination des instruments et assure le mélange complet du flux d'aérosol de NaCl avec le flux d'air de dilution. À partir de ce point, la concentration de particules en amont est mesurée par un CPC (CPC1) et la distribution granulométrique de la mobilité des particules est surveillée avec un granulomètre à balayage de mesure par mobilité (SMPS) (SMPS1). La

distribution granulométrique des particules est surveillée pour s'assurer que le DGM est à l'intérieur de la plage de $0,075 \pm 0,030 \mu\text{m}$ et que l'ETG ne dépasse pas 1,86. L'aérosol est ensuite pompé au travers de la chambre d'essai où se situe le masque à être testé. Ce masque est préparé selon la méthode décrite à la section suivante. La pression est mesurée à l'aide de baromètres en amont et en aval du masque N95 (P_1 et P_2 , respectivement), ce qui permet d'obtenir la perte de charge à travers du masque, soit $\Delta P = P_2 - P_1$.

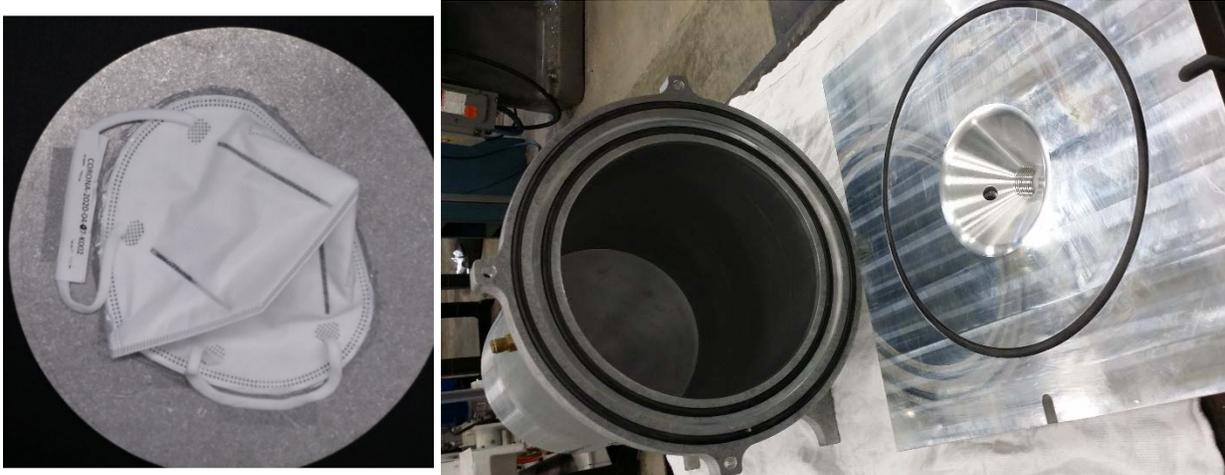


Figure 2. Montage du masque N95 et chambre d'essai. (À gauche : masque N95 collé sur un disque percé d'un trou de 90 mm au centre. À droite : chambre d'essai du masque, ouverte) Au début de la chambre, se trouve un cône d'expansion de 10 cm de longueur, allant d'un raccord Swagelok de $\frac{1}{2}$ po au cylindre de 17 cm de diamètre x 16,5 cm de longueur menant au masque N95 testé. Un autre cône se trouve derrière le masque N95, où l'aérosol est évacué. La chambre est pourvue d'attaches rapides qui réduisent le temps nécessaire pour changer les disques portant les masques N95 collés.

En aval du masque N95, les mesures sont effectuées à l'aide d'un deuxième CPC (CPC2) et d'un deuxième SMPS (SMPS2). Les deux SMPS, de part et d'autre du masque N95, fournissent des données permettant d'estimer l'efficacité de filtration du masque N95 candidat en fonction de la masse et de la taille des particules. Le système peut également être utilisé sans les SMPS (qui sont un ajout à la procédure du NIOSH), si la taille des particules de l'aérosol en amont du masque N95 est connue.

À l'exception des SMPS, toutes les lectures instrumentales sont enregistrées par un système d'acquisition de données à une fréquence de 1 Hz. Les SMPS sont réglés pour effectuer un balayage toutes les 120 secondes. Ces données sont également enregistrées par un système d'acquisition de données.

La valeur approximative de l'efficacité de filtration du masque N95 est donnée par :

$$\eta = 1 - \frac{C_{\#,2}}{C_{\#,1}} \quad (\text{équation 3})$$

L'aérosol est ensuite filtré avant que son humidité relative soit mesurée par un hygromètre (HR), la température par un thermocouple (T_3) et la pression par un baromètre (P_3). Le flux d'air passe ensuite par un rotamètre où le débit volumétrique est mesuré. Un régulateur de débit massique réglé à 82,9 l_s/min régule le débit juste avant la pompe, le reste du débit cible de 85 l_s/min à travers le masque étant pompé par les instruments en aval, soit le CPC2 (1,5 l_s/min) et le SMPS2 (0,6 l_s/min).

2.3 Méthode d'essai

Les masques N95 candidats sont d'abord étiquetés avec les numéros de lot et d'échantillon pour faciliter le suivi et la tenue des registres. Les sangles de maintien élastiques sont coupées pour simplifier la manipulation et éviter la réduction de la section efficace de filtrage et la périphérie du masque N95 candidat est fixée sur une plaque circulaire en aluminium avec un adhésif thermofusible. On veille à ce que l'adhésif assure une étanchéité à l'air sur toute la périphérie du masque N95 afin d'éviter les fuites pendant l'essai. Une fois montés sur leur plaque, les masques N95 candidats peuvent être conditionnés dans une chambre environnementale à une température de $38\text{ °C} \pm 2,5\text{ °C}$ et une humidité relative de $85\% \pm 5\%$ pendant 25 ± 1 heure. Une fois sortis de cette chambre, les masques sont scellés dans des sacs en plastiques étanches et immédiatement transférés pour être testés. Après une dernière inspection visuelle pour vérifier l'absence de déchirures, de coupures ou d'autres dommages, chaque échantillon est testé l'un après l'autre dans les 10 heures suivant sa sortie de la chambre environnementale. Les masques N95 peuvent également être testés sans avoir, au préalable, subi de conditionnement environnemental.

La plaque soutenant le masque est montée dans la chambre d'essai, la face extérieure du masque N95 étant tournée vers le flux d'air incident et, ensuite, la paroi de la chambre est serrée contre la plaque, ses bords étant scellés avec des joints toriques des deux côtés du support de la plaque métallique. La plaque de montage du masque comporte un trou de 90 mm centré dans un disque de 200 mm. La pompe principale est mise en marche et une période de stabilisation des débits et des concentrations commence. Cette période varie généralement entre une et deux minutes. La pression, la température, l'humidité, la concentration de particules donnée par les CPC et la granulométrie des particules donnée par les SMPS sont enregistrés de façon continue pendant 5 minutes. La concentration en amont doit être inférieure à 3×10^5 particules/cm³ (la concentration maximale acceptable pour le CPC actuellement utilisé en amont) tandis que la concentration en aval doit être supérieure à 5×10^2 particules/cm³ (la concentration minimale acceptable pour le CPC actuellement utilisé en aval; voir la figure 3). Tout ajustement du débit de sortie du nébuliseur est effectué avant le début de l'essai afin de maintenir le niveau de concentration d'aérosol souhaité.

Les lectures des concentrations à zéro par les CPC (habituellement environ 10 particules/cm³) sont vérifiées au début et à la fin de chaque jour de mesure et, pour ce faire, nous recueillons 5 minutes de données sans débit de particules (vanne d'arrêt du nébuliseur fermé). Les mesures « à blanc », effectuées à l'aide d'une plaque de montage sans masque, donnent les concentrations de particules à la limite supérieure de la plage. Ces valeurs sont utilisées pour normaliser les pertes de particules dans le système ainsi que pour corriger les différences mineures d'étalonnage entre les deux CPC. Des mesures à blanc sont effectuées au début et à la fin de la journée et à tous les 8 à 10 masques N95 candidats (environ toutes les 1 à 2 heures) au cours de la journée. Un test quotidien supplémentaire avec un masque N95 de référence, dont la performance est connue, permet de contrôler le processus. Combinées, les valeurs de zéro, de blanc et de référence servent méthode de vérification quotidienne du système de mesure.

Ce processus permet de tester environ 7 ou 8 masques N95 candidats à l'heure, sans compter le temps consacré à la vérification de la méthode et aux contrôles supplémentaires des blancs et des valeurs à zéros (et sans compter non plus le temps de montage et de conditionnement des masques). Des opérateurs expérimentés sont en mesure de changer le masque et de stabiliser les taux de comptage après le redémarrage de la pompe principale en environ 2 minutes entre les essais.

2.4 Méthode d'analyse

L'efficacité de filtration est calculée selon la procédure en quatre étapes exposée ci-dessous. La première étape, après l'importation des données, consiste à calculer la moyenne de la concentration de particules entre le moment du démarrage et l'arrêt d'un essai donné. Les heures de début et d'arrêt sont consignées manuellement pendant l'expérience, au même moment que le sont les valeurs de température et de pression sur la canalisation d'échantillonnage. La deuxième étape consiste à corriger la concentration à zéro des deux CPC, qui a été mesurée à l'étape initiale. La troisième étape consiste à corriger les concentrations, mesurées par les CPC, à la température et à la pression normales ($T = 293 \text{ K}$ et $P = 101,325 \text{ kPa}$). La concentration de particules, corrigée pour tenir compte de la concentration à zéro et de la température et de la pression, est exprimée comme suit :

$$C_{\#,i}^0 = (C_{\#,i} - C_{\#,i}^{Zéro}) \frac{T_i P^\circ}{T^\circ P_i} \quad (\text{équation 4})$$

Enfin, la dernière étape consiste à calculer l'efficacité de filtration à l'aide de la formule suivante :

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{\#,2}^0 C_{\#,1}^{Blanc}}{C_{\#,1}^0 C_{\#,2}^{Blanc}} \right) \times 100 \quad (\text{équation 5})$$

La valeur $C_{\#,i}^{Blanc}$ est la concentration de particules selon le CPC $_i$, mesurée lorsqu'il n'y a pas de masque dans la chambre d'essai.

Étant donné que les concentrations de particules mesurées lors des essais à blanc sont négligeables, que les CPC sont en très bon accord lors des essais à blanc et que les températures et les pressions en amont et en aval des masques sont proches des conditions normales, l'efficacité de filtration approximative, déterminée à partir des valeurs consignées manuellement, se trouve en deçà de 5 % des valeurs finales. Ces valeurs enregistrées manuellement sont donc utilisées aux fins d'assurance de la qualité.

3 Validation de la méthode

3.1 Différences entre le SMEFP du CNRC et la méthode TEB-APR-STP-0059-508 du NIOSH

Les masques N95 utilisés au Canada sont normalement testés et certifiés en suivant le protocole TEB-APR-STP-0059 du NIOSH (ci-après le protocole du NIOSH). Le protocole du NIOSH est lui-même issu du règlement américain 42 CFR 84. Le Centre de recherche en métrologie du CNRC a adapté le protocole du NIOSH tout en développant sa propre procédure d'essai pour trois raisons. En premier lieu, le protocole du NIOSH fait appel à des concentrations de particules très élevées afin de représenter les nuages de poussière auxquels les mineurs et les travailleurs industriels sont exposés. Les travailleurs de la santé ne sont pas exposés à des concentrations comparables, même lors de procédures générant des aérosols. En deuxième lieu, le protocole du NIOSH prescrit l'utilisation d'un détecteur photométrique pour déduire la concentration en termes de masse volumique, ce qui est moins précis que les CPC utilisés ici pour mesurer la concentration en termes de nombre volumique (bien que les SMPS, aussi utilisés ici, puissent également être employés pour déterminer les concentrations en termes de masse volumique). Enfin, le protocole du NIOSH spécifie d'autres détails extrêmement précis, notamment le fabricant et le numéro de modèle des instruments, en particulier le TSI 8130A, et les fournitures à utiliser dans les essais.

Les modifications apportées par le Centre de recherche en métrologie du CNRC représentent donc un accroissement substantiel du coût d'investissement, mais aussi de la précision. Voici plusieurs aspects qui ont été modifiés :

- L'efficacité de filtration, donnée par le SMEFP du CNRC, est obtenue à partir de la concentration exprimée en **nombre** de particules par unité de volume alors que le protocole du NIOSH exige que l'efficacité de filtration soit obtenue à partir de la concentration exprimée en **masse** par unité de volume. Les concentrations en termes de nombre volumique peuvent être spécifiées avec une incertitude plus faible que les concentrations en termes de masse volumique. Il n'existe aucune preuve expérimentale permettant de déterminer si c'est le nombre ou la masse des particules qui soit plus étroitement corrélé au risque d'infection des particules respiratoires malgré que l'on sache qu'il soit probable que les particules plus massives pénètrent moins profondément dans les poumons.
- Des granulomètres à balayage de mesure par mobilité (SMPS) de catégorie recherche ont été utilisés pour s'assurer que les particules générées soient dans la plage granulométrique prescrite au lieu d'utiliser un papier filtre calibré. Il s'agit d'une mesure directe de la taille des particules au lieu d'une valeur déduite. Les SMPS ont également l'avantage de pouvoir fournir des estimations de la concentration exprimée en masse.
- Ni le flux de masse de l'aérosol ni la durée de l'essai, pour ce qui est de la charge massique, ne sont indiqués. Cette information n'est pas essentielle, car le SMEFP du CNRC n'a pas été mis au point pour mesurer les fortes concentrations de poussière auxquelles sont exposés les travailleurs industriels. Toutefois, le système du Centre de recherche en métrologie du CNRC fournit suffisamment d'information pour estimer le flux massique : en combinant les données des CPC et des SMPS avec le débit mesuré. La durée de l'essai est généralement de cinq minutes, mais elle peut être prolongée au besoin.
- Des contraintes assouplies concernant la taille des particules (DGM de $0,075 \pm 0,030 \mu\text{m}$ au lieu de $0,075 \pm 0,020 \mu\text{m}$) et l'humidité ambiante ($30 \pm 20 \%$ HR au lieu de $30 \pm 10 \%$ HR) sont utilisées.

- Le SMEFP du CNRC a été mis au point pour mesurer l'efficacité initiale de la filtration, la mesure la plus pertinente pour les travailleurs de première ligne potentiellement exposés aux particules d'aérosol contenant le virus.

Les paramètres qui sont identiques dans le protocole du Centre de recherche en métrologie du CNRC et celui du NIOSH sont les suivants :

- Les masques N95 candidats sont soumis à un préconditionnement dans une chambre environnementale pendant 25 ± 1 heure à une humidité relative de 85 ± 5 % et à une température de $38 \pm 2,5$ °C.
- Le débit d'air à travers le masque est maintenu à 85 l/min.
- L'aérosol utilisé est une solution de NaCl à 2 % en masse dans de l'eau désionisée.

3.2 Traçabilité et contrôle des processus

3.2.1 Étalonnages

Quatre CPC ont été utilisés dans le SMEFP du CNRC. L'un d'eux, pour lequel un laboratoire indépendant a émis un certificat d'étalonnage, a servi à l'étalonnage des autres CPC au Centre de recherche en métrologie du CNRC pour toutes les plages de concentrations dans lesquelles le mode de comptage individuel des CPC est utilisé. Sur la figure 3, on voit la réponse des trois CPC en fonction de la réponse d'un quatrième CPC étalonné. On constate que la réponse des quatre CPC est linéaire, à l'exception du CPC TSI 3025A, dont la réponse est linéaire au-dessus de 600 particules/cm³.

Un essai à zéro (sans masque ni particule) et un essai à blanc (sans masque, mais avec des particules dans le flux) sont effectués avant et après chaque cycle de mesure. Le ratio des réponses obtenues lors d'un essai à blanc des deux CPC utilisés pour déterminer l'efficacité de filtration ainsi que les mesures du zéro servent à corriger la concentration mesurée. L'analyse faite par le Centre de recherche en métrologie du CNRC exige que les réponses relatives des deux CPC soient comparables aux concentrations utilisées pour mesurer les blancs et tester les masques N95 candidats.

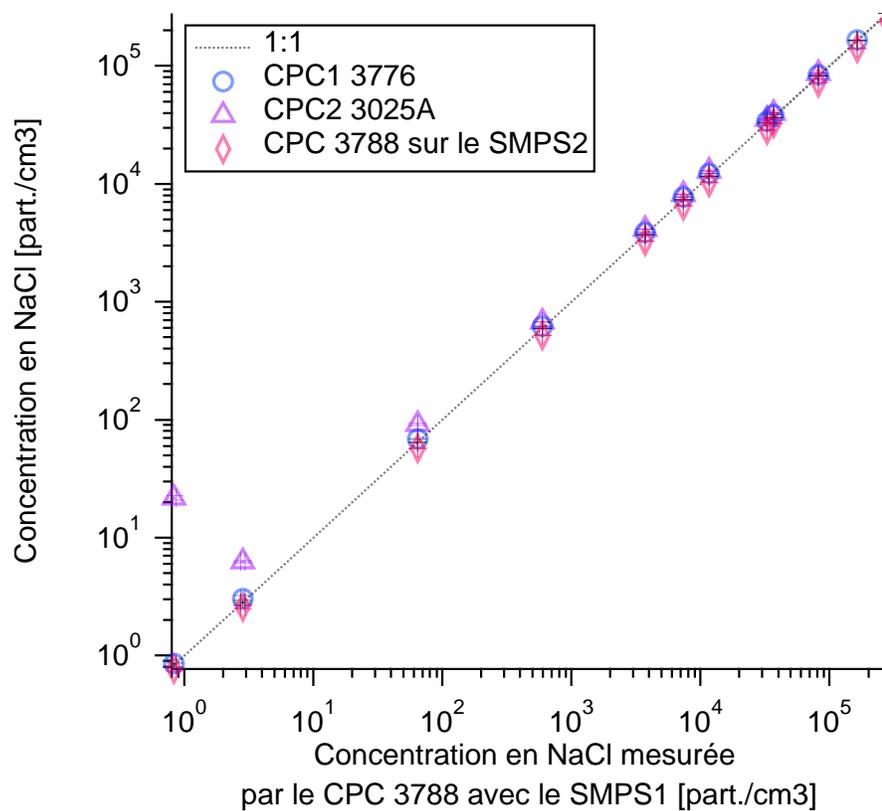


Figure 3 : Linéarité de la réponse des CPC en fonction de celle du CPC TSI 3788 étalonné.

Lors de l'évaluation initiale du SMEFP du CNRC, nous avons vérifié que les réponses des CPC relativement au CPC 3788 étalonné étaient constantes sur toute la plage des concentrations à mesurer.

3.2.2 Assurance de la qualité des données et des analyses

Le contrôle de la qualité des données consiste à :

- Veiller à ce que la différence entre l'estimation initiale (équation 2) et l'efficacité de filtration finale calculée (équation 3) soit inférieure à environ 5 %. Il convient de déterminer la cause des écarts plus importants (p. ex., si un masque présente une perte de charge plus importante).
- S'assurer que toutes les pertes de charge sont positives et confirmer toute valeur aberrante en utilisant les données enregistrées en continu.
- Vérifier les séries chronologiques de tous les mesurands pour s'assurer que le système était stable à chaque point de mesure pendant les cinq minutes.
- Vérifier la distribution granulométrique selon le SMPS en amont du masque N95 candidat pour s'assurer que la distribution granulométrique des particules dans l'aérosol de NaCl est à l'intérieur des spécifications souhaitées.

Les graphiques ou tableaux de toutes les étapes du contrôle de qualité sont enregistrés et archivés.

3.3 Validation de la méthode

Une série d'expériences a été réalisée afin de valider la méthode utilisée avec le SMEFP du CNRC.

3.3.1 Démonstration des plages utilisables

Les masques N95 candidats avec des efficacités de filtration de 65 % à 99,5 % ont été testés comme le montre la figure 4. Il ne s'agit pas de la limite absolue de la plage, dont on sait, d'après les mesures à zéro et à blanc, qu'elle va de 0 % à 100 %, mais il s'agit d'une démonstration de la plage déterminée pour un certain nombre de masques N95 candidats.

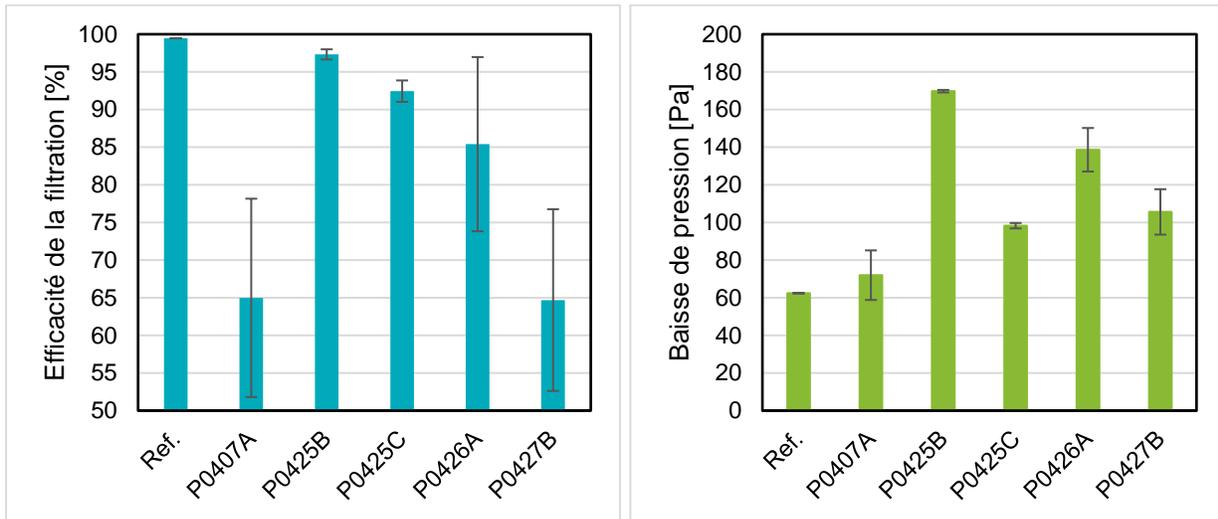


Figure 4 : Illustration de la plage du SMEFP du CNRC, couvrant des taux d'efficacité de filtration d'un peu moins de 65 % à plus de 99 % et une perte de charge de 60 à 170 Pa, pour 1 masque N95 certifié et 26 masques N95 candidats provenant de 5 lots différents.

3.3.2 Répétabilité

Une expérience a été réalisée pour évaluer la répétabilité du SMEFP du CNRC. Un seul masque N95 certifié a été inséré dans la chambre d'essai, testé pendant 5 minutes, puis retiré de la chambre. Le masque est resté collé à la même plaque de montage pour ce test de répétabilité. Ce test a été répété dix fois dans les mêmes conditions d'essai. Les résultats sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Répétabilité déterminée pour le SMEFP du CNRC.

Id. du masque N95	Baisse de pression, ΔP [Pa]	Efficacité de filtration, η [%] (moyenne)	Efficacité de filtration, η [%] (incertitude, $k = 2$)
R007_1	66,7	99,59	0,01
R007_2	73,1	99,19	0,16
R007_3	70,7	99,60	0,02
R007_4	58,5	99,58	0,01
R007_5	68,8	99,57	0,01
R007_6	69,8	99,55	0,01
R007_7	68,0	99,57	0,01
R007_8	83,6	99,59	0,02
R007_9	66,7	99,54	0,01
R007_10	66,8	99,50	0,02
Moyenne	69,4	99,57	

Il est à noter que la variabilité entre les masques devrait être plus importante que la faible incertitude constatée avec cette mesure de répétabilité. La variabilité d'un jour à l'autre n'a pas été évaluée dans le cadre de cet essai. Cet essai de répétabilité démontre la fiabilité des procédures de mise en place et de retrait des masques et la variabilité globale du système au cours de la série de dix essais de 5 minutes.

3.3.3 Précision intermédiaire

Une expérience a été réalisée pour évaluer la précision intermédiaire du SMEFP du CNRC. Cette expérience a consisté à tester 15 masques N95 certifiés différents, du même modèle et du même lot. Ces masques, de marque 3M Aura 9210, ont été testés pendant 15 minutes. Les résultats ont montré que la perte de charge moyenne était de 76 Pa et que l'efficacité de filtration était de $99,45 \pm 0,13 \%$ ($k = 2$).

Tableau 2 : Précision intermédiaire déterminée pour le SMEFP du CNRC.

Id. du masque N95	Baisse de pression, ΔP [Pa]	Efficacité de filtration, η [%] (moyenne)	Efficacité de filtration, η [%] (incertitude, $k = 2$)
R001	69,9	99,48	0,01
R002	71,4	99,43	0,01
R003	72,9	99,56	0,01
R004	72,6	99,56	0,01
R005	73,5	99,47	0,01
R006	70,8	99,26	0,02
R007	72,1	99,41	0,02
R009	69,3	99,26	0,02
R010	76,9	99,63	0,01
R011	72,1	99,57	0,01
R012	69,0	99,34	0,02
R013	74,7	99,59	0,01
R014	73,6	99,30	0,02
R019	69,7	99,35	0,02
R020	71,6	99,52	0,01
Moyenne	73,0	99,50	

3.3.4 Linéarité

Afin d'évaluer la linéarité du SMEFP du CNRC, une série d'expériences a été menée sur un seul masque N95 certifié. Il a d'abord été testé à l'état neuf. Par la suite, nous en avons intentionnellement dégradé la performance en y faisant des trous avec un poinçon métallique de 1,5 mm de diamètre. Nous avons ainsi perforé 10, 20 et 30 trous espacés de manière égale dans le masque, les essais ayant eu lieu après chaque groupe de 10 trous. Les résultats, illustrés à la figure 5, montrent que le SMEFP du CNRC présente une linéarité remarquable avec le nombre de trous sur une plage allant de 85 % d'efficacité de filtration à plus de 99 %. Nous n'avons pas mesuré d'efficacité de filtration inférieures à 85 %, car ces efficacités étaient déjà largement inférieures à l'efficacité cible de 95 %. Cependant, une linéarité similaire est à prévoir sous 85 %, car la condition de blanc correspond à une efficacité de 0 % et nous avons démontré que les CPC étaient linéaires sur une large plage (figure 3).

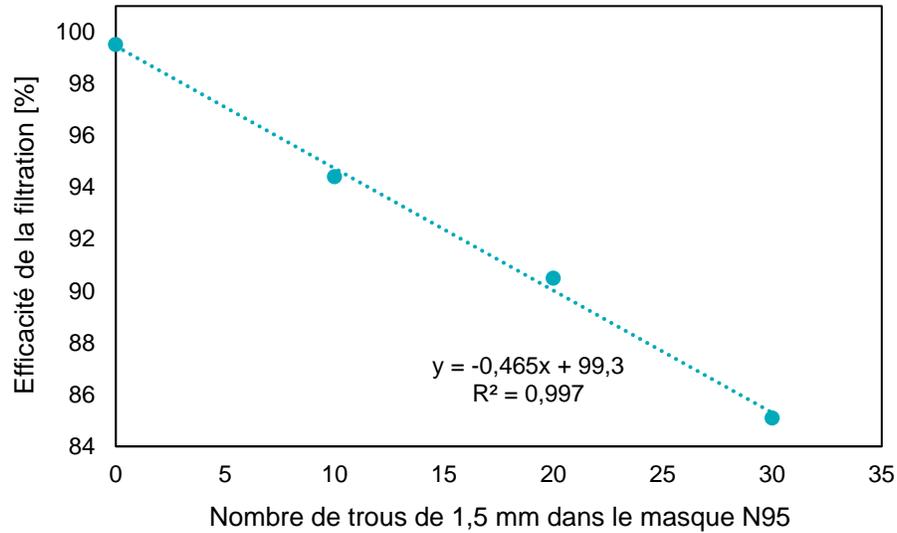


Figure 5 : Démonstration de la linéarité du SMEFP du CNRC

3.3.5 Durée de l'essai des masques N95 candidats

Nous avons évalué l'influence de la durée des essais sur l'efficacité de filtration en comparant les données des 5, 10 et 15 premières minutes des essais de 15 minutes. Ces essais ont été réalisés sur 14 masques certifiés N95, soit des masques 3M Aura 9210. Les résultats présentés à la figure 6 montrent qu'il n'y a aucune différence significative entre un échantillonnage de 5 minutes et un échantillonnage de 10 ou 15 minutes.

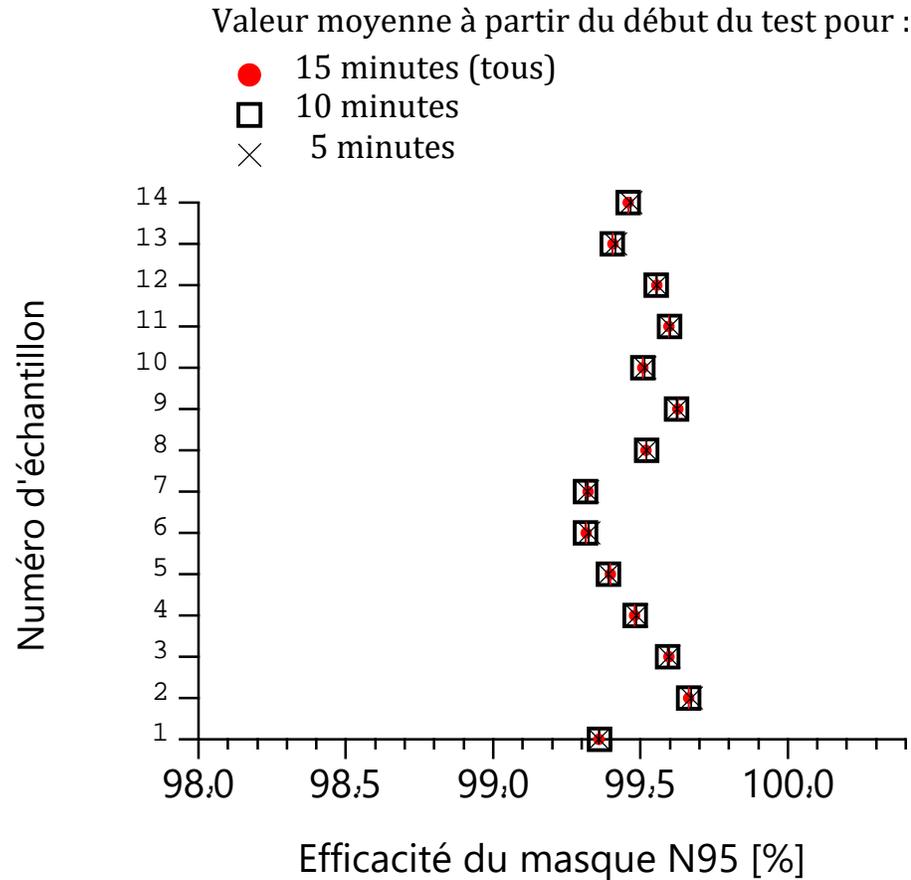


Figure 6 : Démonstration de l'influence de la durée de l'essai du masque sur l'efficacité de filtration pour le SMEFP du CNRC

3.4 Vérification de la méthode

La méthode est vérifiée chaque jour. Trois mesures de l'ensemble du système sont effectuées chaque jour de mesure : un essai avec zéro particule, un essai à blanc (sans masque) et un essai de référence avec un masque N95. Les mesures de l'essai à zéro et de l'essai à blanc ont le même but que le contrôle du zéro et de la portée, couvrant 0 % à 100 % de la plage complète d'efficacité de filtration.

- L'essai à zéro particule sert à vérifier les fuites dans le système et à évaluer tout biais initial pour les CPC et les SMPS. Il est effectué à l'aide d'air filtré par un filtre HEPA à l'entrée du système en début et en fin de journée. En général, les valeurs des CPC devraient être inférieures à 10 particules/cm³. Si cette valeur dépasse 20 particules/cm³, l'expérience doit être interrompue et la source de la fuite doit être trouvée.
- L'essai à blanc sert à fournir des données pour la normalisation des CPC1, CPC2, SMPS1 et SMPS2. Il est effectué à l'aide d'un aérosol de NaCl nébulisé et d'une plaque de montage avec un trou de 90 mm de diamètre, mais sans qu'un masque y soit fixé. Il est effectué en début et en fin de journée et environ chaque heure et demie pendant les périodes de mesure. Cette normalisation est nécessaire, car il y a une certaine perte de particules entre les ports d'échantillonnage, en amont et en aval, lorsque les particules traversent la chambre de mesure des masques.

- L'essai du masque N95 de référence est effectué comme contrôle de répétabilité du système entier. Il est effectué au début de la journée de mesure, avec un masque N95 de référence collé sur une plaque de montage pourvue d'un trou de 90 mm de diamètre.

3.5 Efficacité de la filtration en fonction de la taille

Les mesures prises par les SMPS dans le SMEFP du CNRC permettent de calculer l'efficacité de filtration en fonction de la taille, ce qui donne un aperçu des mécanismes de capture des particules. Cela est possible en utilisant l'équation 2 pour chaque plage de taille enregistrée par les deux SMPS, plutôt que par le nombre total.

Un exemple utilisant les données de deux masques différents est présenté à la figure 7 : la performance du masque B est excellente pour toutes les tailles alors que la performance du masque A est grandement réduite pour les particules de grande taille. Cela indique que le filtre B est moins efficace pour capturer les particules par des mécanismes d'impaction ou d'interception, qui sont liés à l'inertie des particules (section 1.3).

Pour plus de contexte, les lignes horizontales en pointillé de la figure 7 montrent les efficacités de filtration calculées à partir des données des CPC pour les mêmes masques en utilisant l'équation 2. Les deux mesures indépendantes montrent un bon accord. Il est à noter que les conditions de mesure à blanc ont été utilisées pour calculer un facteur d'étalonnage unique pour le SMPS2, valeur transférée depuis le SMPS1. L'autre méthode consiste à calculer un facteur d'étalonnage pour chaque plage de tailles dans les données SMPS. Cette méthode peut introduire une incertitude importante, car les comptages dans une plage de tailles donnée des SMPS sont affectés par de multiples corrections de charge et de diffusion (entre autres facteurs).

Bien que la performance globale basée sur les CPC soit tout indiqué en raison de sa plus grande précision, l'efficacité de filtration en fonction de la taille donne un aperçu du mécanisme par lequel un masque filtre les particules. Les lignes horizontales en pointillé en (A) et (B) représentent les efficacités de filtration obtenues à partir des CPC (équation 2), qui sont en bon accord avec les données des SMPS.

Les données des SMPS peuvent également être utilisées pour fournir des rendements de filtration en tenant compte de la masse volumique. Cette application dépasse le cadre du présent document.

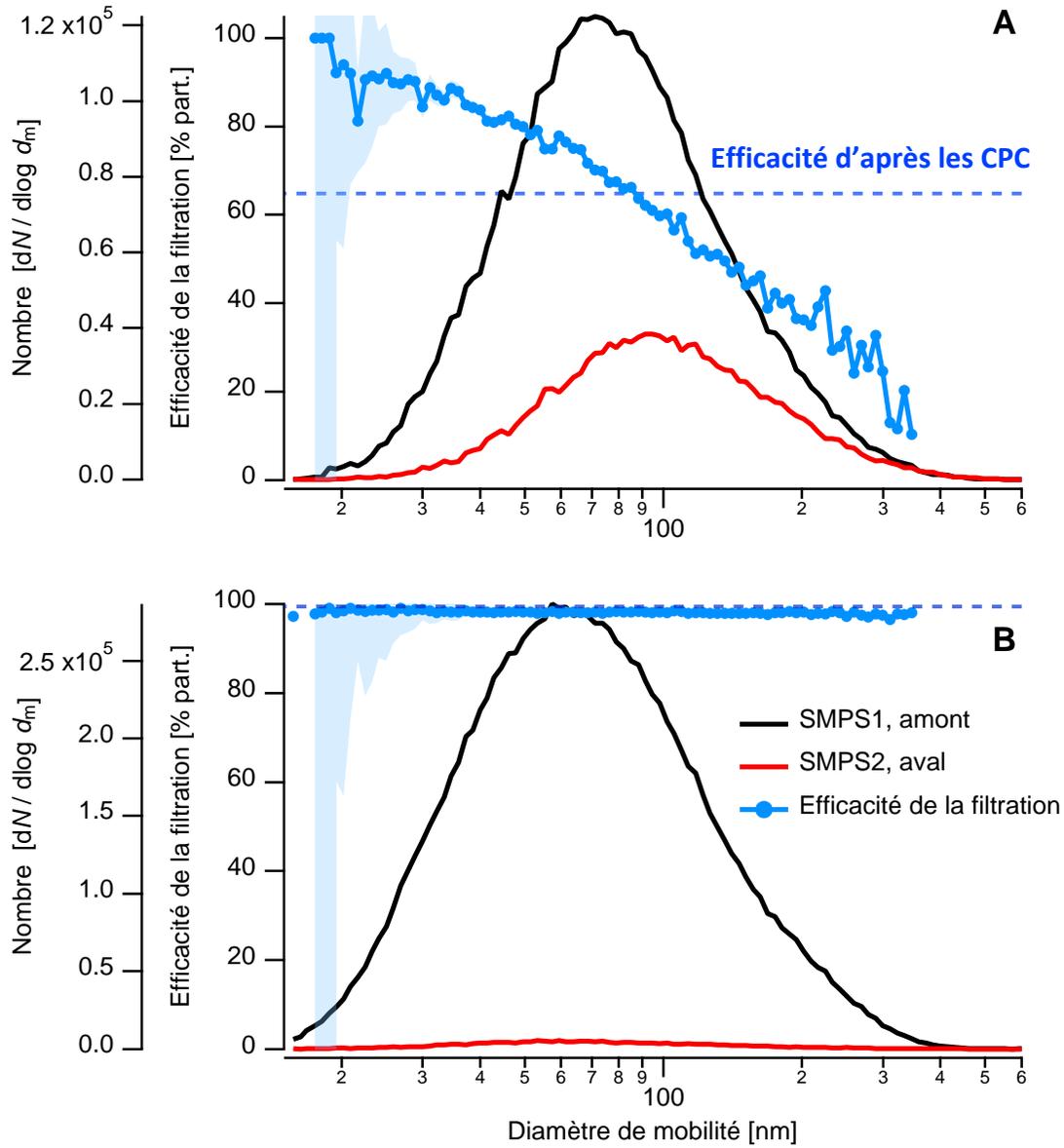


Figure 7 : Illustration de l'efficacité de filtration en fonction de la taille d'après les données des SMPS pour deux échantillons représentatifs de masques

4 Conclusions

Le Centre de recherche en métrologie du CNRC a mis au point un système pour mesurer l'efficacité de filtration contre les particules d'aérosol par les masques en utilisant les composants disponibles dans de nombreux laboratoires de recherche sur les aérosols. Nous avons validé la performance de ce système par la détermination de la plage, de la linéarité, de la durée de l'essai des masques, de la répétabilité et de la précision intermédiaire du système. Nous avons aussi démontré que le SMEFP du CNRC est capable de mesurer l'efficacité de la filtration des masques N95 candidats.

Le présent document fournit aux laboratoires de recherche sur les aérosols des informations sur l'appareil mis au point par le Centre de recherche en métrologie du CNRC et, point important, démontre que toutes les validations de la méthode pour mesurer avec confiance l'efficacité de filtration ont été effectuées et que la vérification quotidienne des méthodes, pour s'assurer que le SMEFP du CNRC fonctionne de manière optimale, est effectuée.

5 Pour de plus amples renseignements

Gregory J. Smallwood, Ph.D.

Agent de recherches principal
Conseil national de recherches du Canada
Centre de recherche en métrologie
1200, chemin de Montréal, immeuble M-9
Ottawa (Ontario) K1A 0R6 Canada

Tél.: (613) 993-1391

Courriel: Greg.Smallwood@nrc-cnrc.gc.ca

Prem Lobo, Ph.D.

Chef d'équipe, Métrologie du Carbone Noir
Conseil national de recherches du Canada
Centre de recherche en métrologie
1200, chemin de Montréal, immeuble M-9
Ottawa (Ontario) K1A 0R6 Canada

Tél.: (613) 993-7433

Courriel: Prem.Lobo@nrc-cnrc.gc.ca

6 Références

- Bake, B., P. Larsson, G. Ljungkvist, E. Ljungström et A. C. Olin. 2019. « Exhaled Particles and Small Airways ». *Respiratory Research* vol. 20, n° 1, p. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12931-019-0970-9>.
- Bescond, A., J. Yon, T. Girasole, C. Jouen, C. Rozé et A. Coppalle. 2013. « Numerical Investigation of the Possibility to Determine the Primary Particle Size of Fractal Aggregates by Measuring Light Depolarization ». *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* vol. 126, n° 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.10.011>.
- Cowling, B. J., D.K.M. Ip, V.J. Fang, P. Suntarattiwong, S. J. Olsen, J. Levy, T.M. Uyeki, et coll. 2013. « Aerosol Transmission Is an Important Mode of Influenza A Virus Spread ». *Nature Communications* vol. 54, art. 1935. <https://doi.org/10.1038/ncomms2922>.
- Fennelly, K.P., J.W. Martyny, K.E. Fulton, I.M. Orme, D.M. Cave et L.B. Heifets. 2004. « Cough-Generated Aerosols of Mycobacterium Tuberculosis ». *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* vol. 169, n° 5, p. 604–609. <https://doi.org/10.1164/rccm.200308-1101OC>.
- Goldsmith, C. S., K. M. Tatti, T.G. Ksiazek, P.E. Rollin, J.A. Comer, W.W. Lee, P.A. Rota, B. Bankamp, W.J. Bellini et S.R. Zaki. 2004. « Ultrastructural Characterization of SARS Coronavirus ». *Emerging Infectious Diseases* vol. 10, n° 2, p. 320–326. <https://doi.org/10.3201/eid1002.030913>.
- Gouvernement des États-Unis. *Code of Federal Regulations*, Title 42 Part 84: « Approval of respiratory protective devices » https://ecfr.io/Title-42/cfr84_main
- Gratton, J., E. Tovey, M.L. McLaws et W.D. Rawlinson. 2011. « The Role of Particle Size in Aerosolised Pathogen Transmission: A Review ». *Journal of Infection* vol. 62, n° 1, p. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2010.11.010>.
- Hinds, William C. 1999. *Aerosol Technology: Properties, Behavior et Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons.
- Jones, R.M. et L.M. Brosseau. 2015. « Aerosol Transmission of Infectious Disease ». *Journal of Occupational and Environmental Medicine* vol. 57, n° 5, p. 501–508. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000448>.
- Kim, J.H., G.W. Mulholland, S.R. Kukuck et D.Y.H. Pui. 2005. « Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0.5 to 83 ». *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. vol. 110, n° 1, p. 31. <https://doi.org/10.6028/jres.110.005>.
- Kulkarni, P., P.A. Baron et K. Willeke. 2011. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons.

Leung, N.H. L., D.K.W. Chu, E.Y.C. Shiu, K.-H. Chan, J.J. McDevitt, B.J. P. Hau, H.-L. Yen, et coll. 2020. « Respiratory Virus Shedding in Exhaled Breath and Efficacy of Face Masks ». *Nature Medicine*, vol. 26, p. 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>.

Lloyd-Smith, J. O., S. J. Schreiber, P. E. Kopp et W. M. Getz. 2005. « Superspreading and the Effect of Individual Variation on Disease Emergence ». *Nature* vol. 438, vol. 7066, p. 355–59. <https://doi.org/10.1038/nature04153>.

Morawska, L., G. Johnson, Z. Ristovski et M. Hargreaves. 2008. « Droplets Expelled during Human Expiratory Activities and Their Origin ». *Proceedings*, 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2008, p. 1023.

National Institute for Occupational Safety and Health 2016. « *Determination of particulate filter efficiency level of N95 series filters against solid particulates for non-powered, air-purifying respirators standard testing procedure* ». Pittsburgh (Pennsylvanie). <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0059-508.pdf>.

Organisation mondiale de la santé (OMS), *Modes of Transmission of Virus Causing COVID-19: Implications for IPC Precaution Recommendations, Scientific Brief, 29 March 2020*. Genève (CH): Organisation mondiale de la santé. <https://extranet.who.int/iris/restricted/handle/10665/331616>.

Papineni, R.S. et F.S. Rosenthal. 1997. « The Size Distribution of Droplets in the Exhaled Breath of Healthy Human Subjects ». *Journal of Aerosol Medicine: Deposition, Clearance, and Effects in the Lung* vol. 10, n° 2, p. 105–116. <https://doi.org/10.1089/jam.1997.10.105>.

Radonovich, L.J., T.M. Perl, V. Davey et H. Cohen. 2009. « Preventing the Soldiers of Health Care From Becoming Victims on the Pandemic Battlefield: Respirators or Surgical Masks as the Armor of Choice ». *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* vol. 3, n° S2, p. S203–10. <https://doi.org/10.1097/DMP.0b013e3181be830c>.

Redrow, J., S. Mao, I. Celik, J.A. Posada et Z.G. Feng. 2011. « Modeling the Evaporation and Dispersion of Airborne Sputum Droplets Expelled from a Human Cough ». *Building and Environment* vol. 46, n° 10, p. 2042–2051. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.011>.

Tellier, R., Y. Li, B.J. Cowling et J.W. Tang. 2019. « Recognition of Aerosol Transmission of Infectious Agents: A Commentary ». *BMC Infectious Diseases* vol. 19, p. 1. <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>.

TSI. *Testeur de filtres automatisé 8130A*. <https://www.tsi.com/products/filter-testers/automated-filter-tester-8130a/>

Wang, Chiu Sen. 2001. « Electrostatic Forces in Fibrous Filters - A Review ». *Powder Technology* vol. 118, n°1–2, p. 166–70. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00307-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00307-2).

Yan, J., M. Grantham, J. Pantelic, P. J. Bueno De Mesquita, B. Albert, F. Liu, S. Ehrman et D. K. Milton. 2018. « Infectious Virus in Exhaled Breath of Symptomatic Seasonal Influenza Cases from a College

Community ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* vol. 115, n° 5, p. 1081–86. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716561115>.

Zieger, P., O. Väisänen, J.C. Corbin, D.G. Partridge, S. Bastelberger, M. Mousavi-Fard, B. Rosati et coll. 2017. « Revising the Hygroscopicity of Inorganic Sea Salt Particles ». *Nature Communications* vol 8., art. 15883. <https://doi.org/10.1038/ncomms15883>.

