

Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

AUTEURS :

S. Chazelet, S. Pacault, département Ingénierie des procédés, INRS

EN
RÉSUMÉ

Les mesures de prévention contre la propagation de la Covid-19 intègrent de nombreux types de masques : pièces faciales filtrantes (type FFP), masques chirurgicaux, masques grand public. L'INRS a développé un banc d'essai pour comparer ces différents masques sur le critère d'efficacité de contrôle à la source, c'est-à-dire de leur capacité à réduire les émissions du porteur vers l'environnement en tenant compte des fuites au visage. Les essais réalisés sur une tête factice qui respire normalement et émet des particules de 1 µm et 3 µm ont conduit à des efficacités comparables entre masques grand public et masques chirurgicaux. Les masques de type FFP bien ajustés au visage constituent une barrière plus efficace contre la propagation du virus.

MOTS CLÉS

Masque / Protection individuelle / Appareil de protection respiratoire / Équipement de protection individuelle - EPI

LES DIFFÉRENTS TYPES DE MASQUES

Dans le cadre de la crise sanitaire actuelle, les mesures de prévention mises en place en milieu professionnel pour diminuer le risque de transmission de la Covid-19 sont à la fois organisationnelles (télétravail, limitation des déplacements...), collectives (nettoyage, ventilation...) et individuelles avec l'ensemble des mesures barrières : distanciation physique, hygiène des mains et utilisation des masques.

Cette dernière mesure se justifie par le mode de transmission identifié du virus SARS-CoV-2 par les gouttelettes générées par un individu infecté lors de la toux, des éternuements, de la parole. Il a été montré que ce mode de transmission directe, de proximité, coexistait avec une transmission indirecte *via* des aérosols plus fins dont le temps de résidence dans l'atmosphère est plus long [1]. Le choix du type de

masque doit être adapté à chaque situation de risque d'exposition.

Différents types de masques sont ainsi recommandés pour limiter la propagation du virus en fonction de l'environnement de travail et de l'activité de chaque individu. En plus des masques déjà utilisés par les professionnels de santé notamment, un nouveau type de masque a vu le jour au début de la pandémie. Il s'agit du masque dit « grand public », défini par une note d'information interministérielle [2], qui peut être utilisé par les professionnels, hors professionnels de santé, dans les lieux collectifs clos et en extérieur sur le site de l'entreprise, comme précisé dans le guide « Masques et prévention de la transmission de la Covid-19 - Principaux usages » de l'INRS [3]. Trois types de masques coexistent donc dans les mesures de prévention mises en œuvre : les masques de type pièce faciale filtrante (FFP), les masques chirurgicaux et les masques en tissu grand public.

Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

MASQUES DE TYPE FFP

Les pièces faciales filtrantes (FFP) sont des appareils de protection respiratoire conçus pour protéger le porteur des gouttelettes et aérosols en suspension dans l'air. Les exigences auxquelles doivent répondre ces masques pour être mis sur le marché sont nombreuses. Outre une efficacité de filtration élevée du matériau filtrant, ces masques doivent présenter une fuite totale vers l'intérieur faible, déterminée sur un panel de sujets et permettant de s'assurer d'un bon ajustement du masque au visage [4]. Trois classes de pièces faciales filtrantes existent. Elles sont notées FFP1, FFP2 et FFP3 dans l'ordre croissant de leur niveau de protection et doivent répondre aux exigences précisées dans le **tableau I**. Leur marquage doit faire apparaître leur classe (par exemple : FFP2) ainsi que la norme de référence par rapport à laquelle ils ont été testés : NF EN 149 +A1 : 2009 [5] et la mention CE suivie de 4 chiffres. Dans le cadre de la lutte contre la Covid-19 et suite à la pénurie de masques de type FFP du début de la crise, l'Union européenne a autorisé l'importation d'appareils de protection respiratoire certifiés selon des normes étrangères jusqu'au 1^{er} septembre 2020 puis l'écoulement des stocks réalisés jusqu'au 1^{er} mars 2021. C'est le cas par exemple des masques de type N95 américain [6], équivalents aux masques FFP2.

↓ **Tableau I**

➤ **EXTRAIT DES EXIGENCES DE LA NORME EN 149+A1 [5]**

Classe	Niveau minimum d'efficacité de filtration du matériau filtrant (vis-à-vis d'aérosols de 0,6 µm de diamètre) (%)	Niveau maximum de fuite vers l'intérieur (intégrant les fuites au visage, celles de l'appareil et la pénétration à travers le matériau filtrant) (%)
FFP1	80	22
FFP2	94	8
FFP3	99	2

MASQUES CHIRURGICAUX

Les masques à usage médical ou masques chirurgicaux sont des dispositifs médicaux. Ils sont destinés à éviter la projection vers l'entourage des gouttelettes émises par celui qui porte le masque. Ce type de masque protège également celui qui le porte contre les projections de gouttelettes émises par une personne en vis-à-vis. Il en existe de trois classes différentes, notées I, II et IIR (R : résistance à la projection de sang) qui se distinguent notamment par l'efficacité de filtration du matériau filtrant vis-à-vis de particules biologiques de 3 µm de diamètre. Celle-ci doit être au minimum égale à 95 % et à 98 % respectivement pour les masques à usage médical de type I et II, selon NF EN 14683 + AC : 2019 [7]. Pour ces types de masques, qui ne sont pas des appareils de protection respiratoire, aucune exigence en termes de fuite vers l'intérieur n'existe. Leur marquage doit faire apparaître leur classe ainsi que la norme de référence par rapport à laquelle ils ont été testés : NF EN 14683 + AC : 2019 (ou 2014 ou 2005) et la mention CE.

MASQUES GRAND PUBLIC

Les masques grand public ne sont ni des dispositifs médicaux, ni des appareils de protection respiratoire. Pour être efficace, ce type de masque doit être porté par chaque membre d'un collectif. L'exigence de conception des masques grand

public est que l'efficacité de filtration minimale des tissus utilisés, mesurée vis-à-vis de particules inertes de 3 µm, soit supérieure respectivement à 70 % ou à 90 % selon que le masque est classé « efficacité supérieure à 70 % » (anciennement appelé UNS2) ou « efficacité supérieure à 90 % » (anciennement appelé UNS1) selon le référentiel AFNOR SPEC 76-001 [8]. Depuis le 28 janvier 2021, seuls les masques grand public « efficacité supérieure à 90 % » sont recommandés. Mais au moment du démarrage de cette étude, les deux classes, notées 1 et 2, de masques grand public pouvaient être utilisées.

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DE FILTRATION

Si l'efficacité de filtration des matériaux qui constituent les masques est bien maîtrisée et élevée, l'efficacité globale d'un masque porté par une personne va dépendre des fuites entre le masque et le visage de la personne. Dans le cas particulier de la crise sanitaire actuelle, la question porte principalement sur l'efficacité globale des masques pour réduire les émissions de leur porteur vers son environnement proche, c'est-à-dire lorsqu'un flux d'air chargé en particules¹ circule de l'intérieur vers l'extérieur du masque. On parlera d'efficacité barrière ou efficacité de contrôle à la source, la source étant le sujet porteur du masque. Le flux exhalé par celui-ci se divisera donc en deux

1. Le terme particule est général. Il englobe les gouttelettes et les aérosols qui sont des particules en suspension plus ou moins longue dans l'air en fonction de leur taille.

parties : celle qui circule à travers le filtre qui va capter les particules avec son efficacité de filtration et l'autre qui sortira par les fuites sans que les particules transportées ne soient capturées (figure 1).

Plusieurs travaux ont été menés pour mettre en évidence ces fuites. Des expériences de visualisation des gouttelettes émises au moyen d'une source laser ont par exemple été menées [9]. Verma et al. ont réalisé des observations de ces émissions sur une tête factice, connectée à une machine à fumée, pour différents design de masques et matériaux filtrants. Les fuites au niveau du nez pour les masques en tissu sans barrette nasale ont par exemple été mises en évidence ainsi que la réduction de ces émissions lorsque le masque est bien ajusté. Néanmoins ces travaux ne présentent pas de quantification de cet ajustement ou des émissions observées. Ces fuites vont avoir un impact sur l'efficacité globale du masque en tant que barrière vis-à-vis de l'émission de particules, potentiellement chargées en virus, dans l'environnement. L'efficacité barrière ou efficacité de contrôle à la source du masque devra donc prendre en compte ces fuites pour donner une image de la protection plus proche de la réalité que la seule efficacité de filtration du matériau filtrant constituant les masques. L'efficacité de contrôle à la source se définira donc comme le rapport entre le débit de particules collectées par le masque et le débit de particules émises par le porteur en tenant compte des fuites. Récemment, Lindsley et al. [10, 11] ont effectué des mesures d'efficacité du contrôle à la source sur différents types de masques (N95, masques chirurgicaux et masques en tissu) en mesurant le total des particules émises par une tête factice, avec et sans masque. Leur montage expérimental utilise

Figure 1 : Différentes voies d'émission des particules émises par le porteur du masque.



une tête factice et un simulateur de toux qui peut également reproduire une respiration normale. Un aérosol salin contenant de la fluorescéine, émis par la tête, est collecté sur un impacteur en cascade qui permet de déterminer la masse de particules collectées pour différentes fractions granulométriques variables entre $0,6 \mu\text{m}$ et $7 \mu\text{m}$. Les résultats montrent que l'efficacité de contrôle à la source est légèrement meilleure lorsque la tête « tousse » plutôt que lorsqu'elle « respire », pour une taille de particules donnée. Des écarts importants d'efficacité de contrôle à la source ont été mesurés par ces auteurs entre les masques N95 d'une part (entre 83 % et 99 %) et les masques chirurgicaux et en tissu d'autre part (entre 35 % et 66 %). Ces auteurs ont également réalisé des essais d'ajustement sur trois sujets et sur la tête factice, pour chaque masque. Ils montrent ainsi que plus l'ajustement est élevé, plus l'efficacité de contrôle à la source est élevée.

Étant donné le très faible nombre de travaux de recherche expérimentale pour quantifier cette efficacité de contrôle à la source, l'INRS a démarré en septembre 2020 une étude pour compléter ces données scientifiques sur trois points.

Le premier est l'impact du débit respiratoire sur l'efficacité de contrôle à la source des masques. Les travaux de Lindsley et al. [11] n'intègrent qu'un cycle respiratoire dans leur protocole, représentatif d'une activité très modérée, ce qui n'est pas représentatif de l'ensemble des activités professionnelles. L'étude présentée fournit des données pour trois cycles respiratoires différents, du repos à une respiration intense. Le second est le type de masque. Les réglementations européenne et américaine, dans le cadre de laquelle se font la majeure partie des travaux scientifiques sur ce sujet, sont différentes. Ainsi très peu de données existent dans la littérature sur les deux catégories de masques suivants, qui ont donc été intégrées dans l'étude :

- les masques de type FFP certifiés selon la norme EN149 européenne ;
 - les masques en tissu répondant au référentiel AFNOR SPEC 76-001 [8], y compris les masques inclusifs intégrant une fenêtre transparente devant la bouche et utilisés pour le travail avec les enfants en bas âge ou les personnes malentendantes.
- Le dernier est l'impact de la souppape expiratoire sur l'efficacité barrière des masques de type FFP, notamment en comparaison avec

Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

celle des masques chirurgicaux. En effet, les masques de type FFP intégrant une soupape expiratoire sont très utilisés dans le secteur industriel. Lorsque le porteur du masque expire, la soupape s'ouvre pour faciliter la respiration. Une partie du flux de particules émises par le porteur peut donc s'écouler librement à travers la soupape. Cette catégorie de masques FFP avec soupape a donc été étudiée.

L'efficacité de contrôle à la source sera fonction de la taille des aérosols, du masque porté, de l'ajustement du masque sur la tête et du cycle respiratoire. L'étude présentée dans cet article a pour objectif de donner des résultats expérimentaux permettant d'évaluer l'impact de ces différents facteurs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

MASQUES TESTÉS

Le choix des masques intégrés dans l'étude s'est fait en septembre 2020. À cette époque, caractérisée par une pénurie de masques FFP2, réservés pour les personnels soignants, il était possible d'utiliser des masques certifiés selon des normes étrangères. Ainsi cette étude intègre un modèle de masques N95 certifié selon NIOSH 42C FR84 [6]. En plus des masques de type FFP sans et avec soupape expiratoire, cette étude inclut des masques chirurgicaux jetables, des masques en tissu grand public incluant les masques inclusifs et des masques dit réutilisables constitués d'une pièce faciale réutilisable et de filtres amovibles ou lavables. Tous ces modèles ont été achetés dans le commerce dans le courant du dernier trimestre 2020 et étaient donc potentiellement utilisés par les salariés à ce moment-là, toutefois sans chercher à être

représentatif de l'ensemble des masques alors disponibles.

MASQUES GRAND PUBLIC

Cinq modèles de masques en tissu ont été étudiés (notés C1 à C5) et deux modèles de masques inclusifs (notés I1 et I2) (figure 2).

Deux modèles de masques, notés C2 et C5, sont vendus sans barrette nasale. Or, il existe des barrettes nasales externes qui peuvent être collées à l'extérieur du masque au niveau du nez. Afin d'étudier la contribution de cet élément d'ajustement à l'efficacité de contrôle à la source des masques en tissu,

les masques C2 et C5 ont été testés neufs (sans barrette nasale) et avec l'ajout d'une barrette nasale externe.

MASQUES CHIRURGICAUX

Trois modèles de masques chirurgicaux jetables ont été intégrés à l'étude (figure 3) notés M1 à M3.

MASQUES RÉUTILISABLES

Trois modèles de masques réutilisables ont été inclus dans l'étude (figure 4), notés R1 à R3. Ils sont constitués d'une pièce faciale réutilisable et de filtres jetables ou lavables selon le modèle. Le premier est conforme aux spécifications de

Figure 2 : Illustration des modèles de masques grand public testés et classification.



Figure 3 : Illustration des modèles de masques chirurgicaux jetables testés et certification.



Figure 4 : Illustration des modèles de masques réutilisables testés et certification.

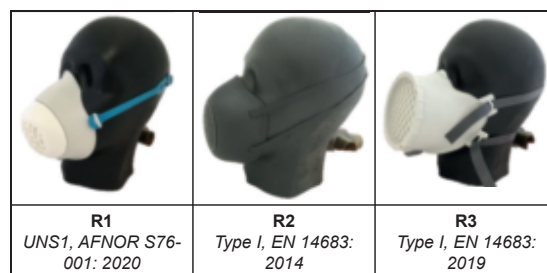


Figure 5 : Illustration des modèles de masques de type FFP testés et certification.

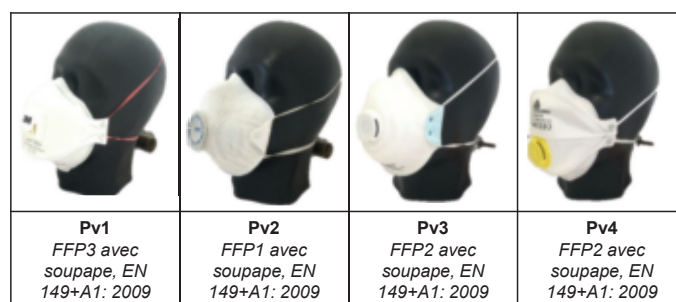


l'AFNOR et les deux autres sont certifiés selon la norme NF EN 14683 + AC pour les dispositifs médicaux.

MASQUES FFP OU ÉQUIVALENTS

Deux modèles de masques, l'un FFP2 (noté P1) et l'autre N95 (noté P2), sans soupape, ont été testés (figure 5) ainsi que quatre modèles de masques de type FFP avec soupape expiratoire (figure 6) notés Pv1 à Pv4. Le modèle P2 est équipé d'élastiques à positionner derrière les oreilles contrairement aux masques FFP.

Figure 6 : Illustration des modèles de masques de type FFP avec soupape expiratoire testés et certification.



PROTOCOLE DE MESURE DE L'EFFICACITÉ DE CONTRÔLE À LA SOURCE D'UN MASQUE

Le détail du protocole de mesure est fourni en annexe 1 et dans l'article de Chazelet et al. [14].

Les mesures d'efficacité de contrôle à la source ont été réalisées pour chaque modèle de masque positionné sur une tête factice. Les modèles de masques avec élastiques derrière les oreilles sont accrochés sur la tête factice au moyen d'une barrette externe. La tête factice est connectée à une machine à respirer qui permet de simuler des cycles respiratoires, du repos à une activité intense. Des particules inertes sont générées dans le flux exhalé de la tête et sortent par la bouche de celle-ci. L'ensemble est placé dans un conduit fermé à l'intérieur duquel circule un débit d'air calme. Le débit d'émission de particules est déterminé expérimentalement par prélèvement au cours du temps d'une concentration représentative de celle des particules dans le conduit. Cette mesure est d'abord réalisée sans masque positionné sur la tête puis avec un masque. L'efficacité de contrôle à la source correspond ensuite à la quantité de particules arrêtées par le masque

divisée par celles émises en l'absence de masque.

Ces essais sont réalisés :

- pour 3 poses différentes de chaque modèle de masque ;
- pour 3 cycles respiratoires (repos, moyen, intense) ;
- pour 2 tailles de particules (1 µm et 3 µm).

Une analyse statistique a ensuite été réalisée sur l'ensemble des données modélisées (annexe 1).

PROTOCOLE DE MESURE DE L'AJUSTEMENT DES MASQUES

En parallèle des mesures sur tête factice de l'efficacité de contrôle à la source des masques, des essais d'ajustement sur sujets des mêmes modèles de masques ont été réalisés. Ces essais ont été développés pour s'assurer que les appareils de protection respiratoire s'adaptent bien au visage de leur porteur, que les fuites sont réduites et ainsi que la protection respiratoire lorsque le sujet respire est optimale. Dans le cas de cette étude, l'objectif des essais d'ajustement est d'obtenir une comparaison entre les différents modèles de masques en termes de fuite au visage.

Le détail du protocole est fourni en

annexe 2 et détaillé dans l'article de Chazelet et al. [16].

Tous les modèles de masques n'ont pas pu être testés du fait de leur manque de disponibilité sur le marché à la période de réalisation des essais d'ajustement. Les masques dont l'ajustement a été évalué sont listés ci-dessous, par catégorie :

- masques grand public : C3, C4, C5, I2 ;
- masques chirurgicaux jetables : M1, M2, M3 ;
- masques réutilisables : aucun ;
- masques FFP ou équivalent : P1, P2, Pv2, Pv3, Pv4.

Les essais ont été menés sur 6 sujets. Au total, chaque sujet effectue 36 essais d'ajustement (3 essais d'ajustement sur chacun des 12 modèles de masques) en une journée environ.

RÉSULTATS

EFFICACITÉ DE CONTRÔLE À LA SOURCE

Les figures 7 et 8 page suivante présentent l'ensemble des mesures de l'efficacité de contrôle à la source obtenues respectivement avec des particules de 3 µm et de 1 µm. Les

Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

Figure 7 : Efficacité de contrôle à la source de particules de 3 µm de diamètre par catégorie de masque en fonction du débit respiratoire.

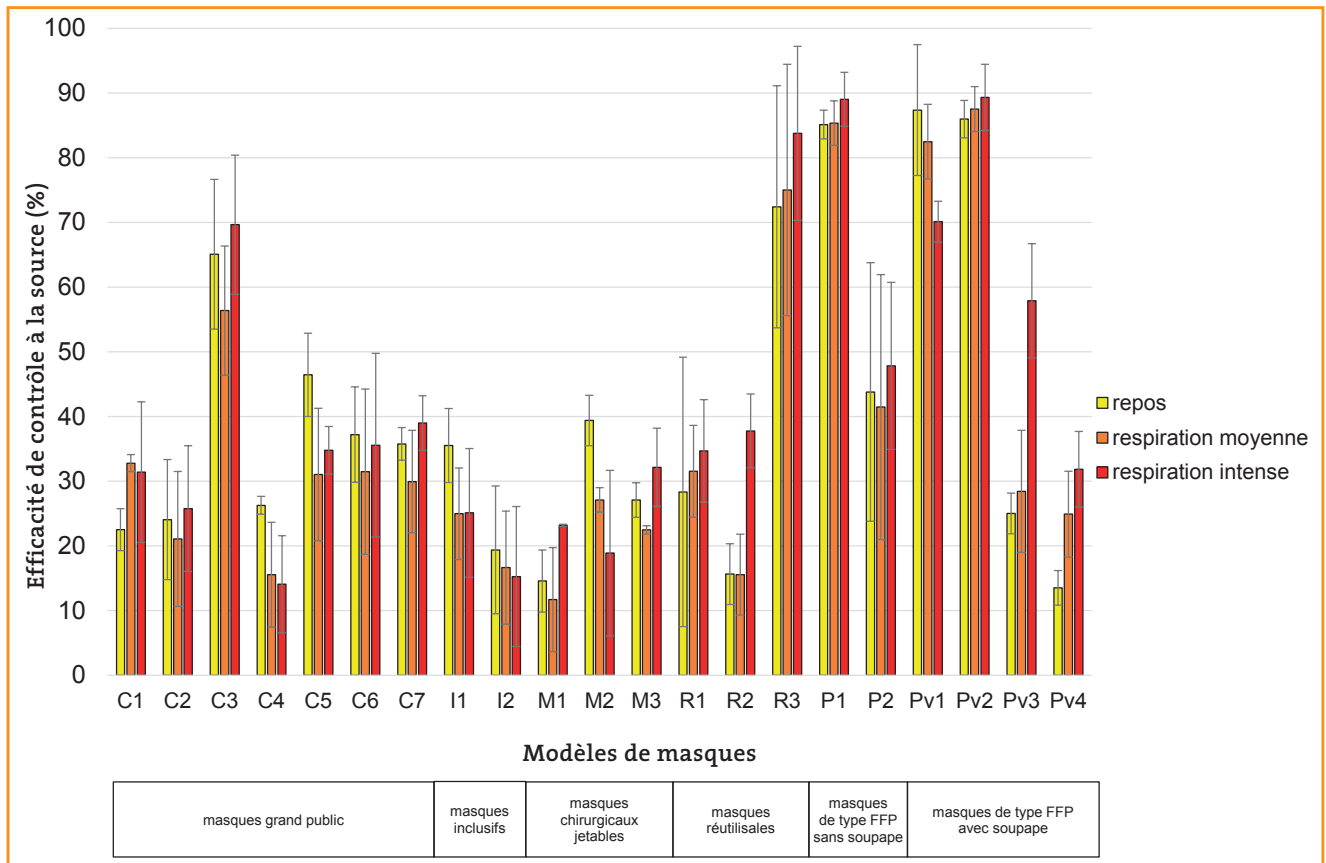
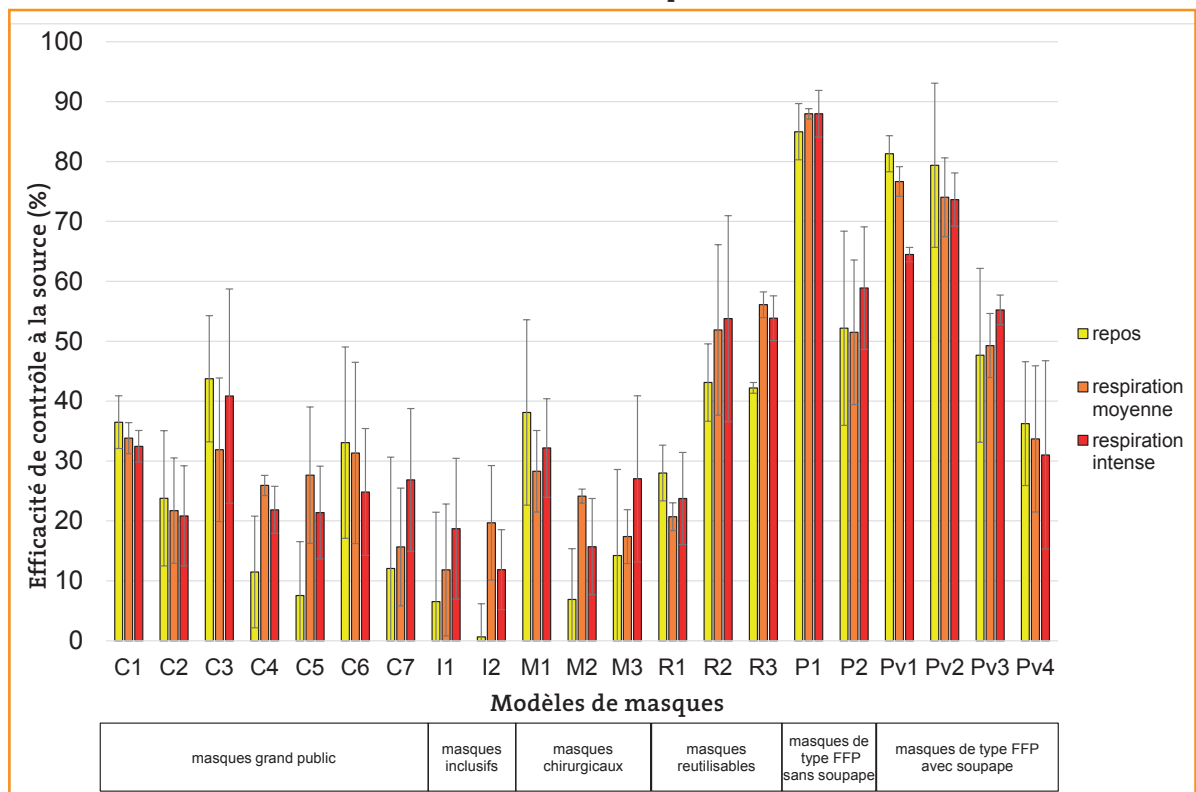


Figure 8 : Efficacité de contrôle à la source de particules de 1 µm de diamètre par catégorie de masque en fonction du débit respiratoire.



barres d'erreur correspondent aux écarts-types obtenus sur les 3 poses du masque.

Pour les deux tailles de particules émises par la tête factice, les tendances obtenues sont similaires. Des écarts importants sont observés entre les différentes catégories de masques. Les niveaux les plus faibles d'efficacité de contrôle à la source sont obtenus par certains masques grand public et notamment les masques inclusifs dont l'efficacité de contrôle à la source ne dépasse pas 20 % vis-à-vis de particules de 1 µm. Parmi les masques grand public, le modèle C3 présente une efficacité de contrôle à la source nettement supérieure aux autres masques de sa catégorie et supérieure même à celle du masque P2 à 3 µm.

Les niveaux les plus élevés sont enregistrés pour les masques de type FFP et notamment le masque P1, de classe FFP2 sans soupape expiratoire dont l'efficacité de contrôle à la source est proche de 90 % pour les particules de 1 µm et de 3 µm. Si l'on considère les masques FFP avec soupape, on constate que le masque Pv4 présente des résultats similaires à ceux des masques chirurgicaux avec une efficacité moyenne ne dépassant pas 40 %. En revanche, les masques Pv1 et Pv2 présentent des efficacités du niveau de celles des masques FFP sans soupape, supérieures à 70 % en moyenne.

Les masques réutilisables semblent offrir une efficacité élevée de contrôle à la source, avec leur pièce faciale en élastomère, mais les sangles de serrage du masque peuvent se rompre et se détendre pendant les tests, ne permettant plus de serrer le masque sur la tête à la fin des tests. C'est ce phénomène de détente de l'élastique de serrage qui explique que l'efficacité du masque R2 chute de 51,8 % à 15,5 % à débit respiratoire moyen entre

les essais à 1 µm et à 3 µm réalisés successivement.

L'ensemble des données d'efficacité de contrôle à la source a été analysé en regroupant les masques par catégorie commune.

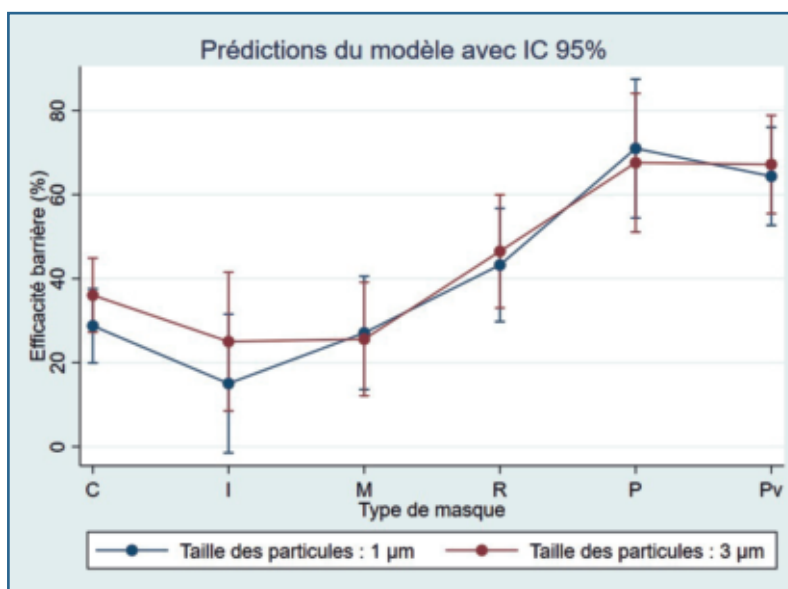
La première conclusion de l'analyse statistique est que le rythme respiratoire (du repos à un rythme respiratoire intense) n'a pas d'effet sur l'efficacité barrière des masques mesurée. L'absence d'effet observé sur la gamme de débit respiratoire testé est en accord avec les travaux de Lindsley et al. [11]. Ces auteurs ont, en effet, comparé l'efficacité de contrôle à la source dans le cas d'un air exhalé à un débit de 15 L/min et dans le cas de la toux. Leurs résultats montrent que l'augmentation du débit respiratoire maximum d'un facteur proche de 14 entre la respiration modérée et la toux n'entraîne qu'une augmentation limitée de l'efficacité barrière. L'augmentation de la vitesse d'émission des particules lors de la toux entraîne une augmentation de leur impactation

sur le masque mais qui ne se traduit que par un faible accroissement de l'efficacité de contrôle à la source. Dans le cas d'un masque chirurgical par exemple, celle-ci augmente de 42 % en respiration normale à 56,3 % lors d'une toux.

L'analyse statistique sur l'ensemble des données a mis en évidence une interaction entre le facteur taille des particules et le facteur catégorie de masques ($p = 0,0145$), c'est-à-dire que l'effet de la taille des particules (entre 1 µm et 3 µm) n'est pas le même selon la catégorie de masque étudiée. La figure 9 présente les valeurs modélisées de l'efficacité de contrôle à la source.

Le modèle met en évidence que l'efficacité de contrôle à la source des masques de type grand public, en tissu ou inclusif, augmente avec l'augmentation de la taille des particules de manière statistiquement significative. En revanche, pour les autres catégories de masques, l'efficacité de contrôle à la source ne varie pas avec la taille des particules.

Figure 9 : Efficacité de contrôle à la source calculée par le modèle statistique pour chaque catégorie de masque en fonction de la taille des particules.



Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

Les résultats de Lindsley et al. présentent les mêmes tendances pour des aérosols générés sur la plage 0,6 µm à 7 µm et pour tous les modèles de masques en tissu testés à un rythme respiratoire très modéré [11]. Ce résultat s'explique en partie par le fait que l'efficacité de filtration des matériaux filtrants constituant les masques grand public est évaluée vis-à-vis de particules de 3 µm de diamètre, et peut être bien plus faible à des tailles de particules inférieures.

Étant donnée l'interaction mise en évidence précédemment, l'effet simple de la catégorie de masque a été testé pour chaque taille de particule. Lors de l'émission de particules de 1 µm de diamètre, les efficacités de contrôle à la source des masques grand public, inclusifs, chirurgicaux jetables sont équivalentes. Les masques FFP avec et sans soupape présentent des efficacités de contrôle à la source significativement supérieures aux autres catégories de masques mesurées. Enfin, les masques réutilisables ont des efficacités de contrôle à la

source à 1 µm juste équivalentes en moyenne à celles des masques de type FFP ($p = 0,054$) avec une forte hétérogénéité. Les comparaisons à 3 µm fournissent les mêmes conclusions sauf pour les masques inclusifs dont les efficacités augmentent et deviennent équivalentes à celles des masques réutilisables ($p = 0,289$). Pour les deux tailles de particules, aucune différence significative n'a été mesurée entre les masques de type FFP sans soupape et les masques de type FFP avec soupape expiratoire.

EFFET DE L'AJOUT D'UNE BARRETTE NASALE EXTERNE

Les résultats d'efficacité de contrôle à la source pour deux masques grand public, C2 et C5, ont été comparés sans et avec barrette nasale externe collée sur le masque, pour les trois cycles respiratoires et pour trois exemplaires.

Les résultats obtenus suite à l'ajout d'une barrette nasale externe sont différents entre le masque C2 et le masque C5.

Le masque C2 voit son efficacité de contrôle à la source augmenter de 23,1 % à 34,4 % vis-à-vis des particules de 1 µm et de 26,2 % à 37,5 % vis-à-vis des particules de 3 µm. Par contre, les variations sont inversées pour le masque C5 dont l'efficacité de contrôle à la source chute de 23,9 % à 18,7 % vis-à-vis des particules de 1 µm et également de 38,3 % à 35,4 % vis-à-vis des particules de 3 µm. Une explication à cette différence est que le masque C5 est beaucoup plus grand (264 cm²) que le masque C2 (213 cm²) et ne s'adapte pas correctement à la tête au niveau des joues et sous le menton. L'installation de la barrette nasale externe déplace probablement les fuites au lieu de les réduire et le bénéfice en termes d'efficacité du contrôle à la source est moindre.

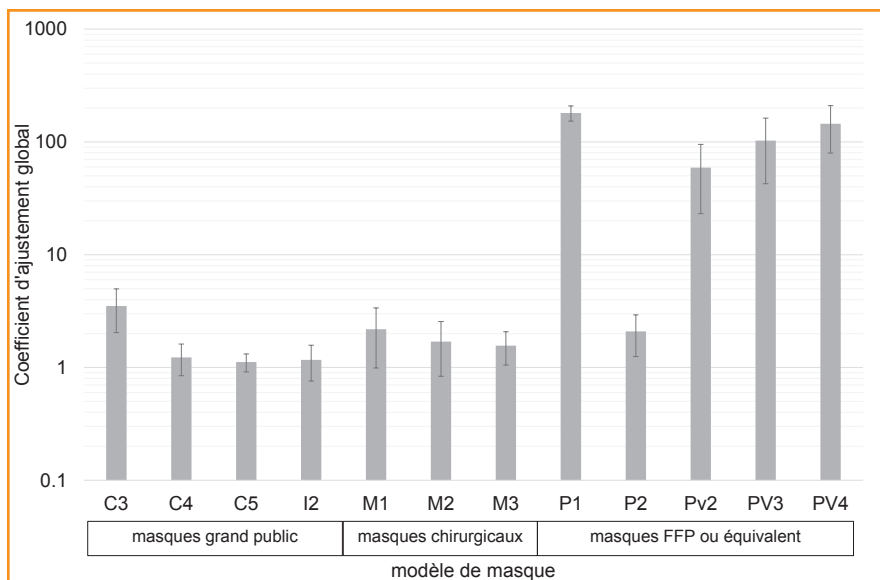
COEFFICIENTS D'AJUSTEMENT

Les résultats des mesures d'ajustement des masques sur sujets, décrits au paragraphe « *Protocole de mesure de l'ajustement des masques* », sont présentés sur la **figure 10**. Les barres d'erreur représentent l'écart-type obtenu sur l'ensemble des 18 essais réalisés pour chaque modèle de masque (6 sujets x 3 poses).

Deux ensembles de valeurs de coefficients d'ajustement apparaissent :
 ● celles qui sont inférieures à 5 et obtenues de manière très uniforme avec les masques grand public et les masques chirurgicaux jetables ;
 ● celles qui sont voisines ou supérieures à 100 et qui sont obtenues par les appareils de protection respiratoire P1, P2, P3 et P4.

Le masque P2 possède un design différent de celui des autres masques FFP avec un pli vertical et des élastiques derrière les oreilles. Ses résultats se démarquent des masques FFP, avec un coefficient d'ajustement global moyen de 2,1 (écart-type de 0,8). Une explication à cet écart pourrait être la différence du

Figure 10 : Coefficients d'ajustement global obtenus sur différents types de masques (moyenne sur six sujets)



système de fixation de ce masque sur la tête, les élastiques faisant le tour des oreilles étant difficilement ajustables.

Parmi les masques en tissu le masque C3 se distingue avec un coefficient d'ajustement global moyen de 3,5 (écart-type de 1,5), supérieur aux autres masques grand public. Le masque C3 possède en effet une barrette nasale et une découpe qui s'adapte bien au visage. Les résultats sont en accord avec ceux de Oberg et al. sur l'ajustement des masques chirurgicaux. Leurs essais menés sur 5 modèles de masques chirurgicaux et avec 20 sujets ont conduit à des coefficients d'ajustement variables entre 2,5 et 9,6 [18]. Les mêmes tendances ont été observées par Lindsley et al. [11] lors d'essais d'ajustement réalisés avec 3 sujets sur 9 modèles de masques en tissu, 2 modèles de masques chirurgicaux et 2 modèles de masques N95. Leurs résultats présentent un coefficient d'ajustement global moyen pour les masques en tissu de 2,4 (écart-type de 0,8) alors qu'il atteint 155 (écart-type de 11) pour les masques N95. Leurs résultats sur les 2 modèles de masques chirurgicaux sont par contre contradictoires : le premier présente un coefficient d'ajustement global de l'ordre de celui d'un masque N95 et le second un coefficient d'ajustement global similaire à celui des masques en tissu.

CONCLUSION

L'étude présentée avait pour objectif d'étudier les performances de différentes catégories de masques utilisés dans le cadre de la pandémie pour limiter la propagation du virus. Un protocole expérimental a été développé pour étudier l'efficacité des masques comme élément

de contrôle de la source de particules émises par une tête factice. Le flux de particules exhalé par la tête est en parti filtré par le matériau filtrant constituant le masque. Une fraction de ce flux sort sans être filtré par les fuites entre le visage et le masque. L'efficacité de contrôle à la source permet de rendre compte de manière globale de la capacité d'un masque à réduire les émissions de particules vers l'environnement. En ce sens, cette mesure rend mieux compte de la réalité du port de masque que la seule mesure de l'efficacité du matériau filtrant constituant le masque.

Les résultats de l'étude illustrent donc dans un premier temps le fait que l'efficacité de contrôle à la source d'un masque, dans des conditions données de respiration et de taille des particules émises, est différente de l'efficacité de filtration du matériau filtrant. Par exemple, la conformité aux exigences des spécifications AFNOR SPEC 76-001 pour les masques grand public [8] tels que ceux testés dans l'étude, implique que l'efficacité de filtration de leur matériau filtrant soit supérieure à 90 % par rapport à des particules de 3 µm circulant à une vitesse de 6 cm/s à travers le matériau filtrant. Pour le même type de masque, placé sur une tête, l'efficacité moyenne de contrôle à la source à 3 µm varie entre 31 % et 37 % pour un débit respiratoire faible à intense (vitesse équivalente variant entre 2,5 et 11 cm/s).

Les mesures de coefficient d'ajustement permettent de déterminer un critère qui définit la qualité de l'ajustement des masques lorsque ceux-ci sont portés par des sujets qui respirent normalement. Ces mesures ne se font pas dans les mêmes conditions que la mesure de l'efficacité de contrôle à la source mais permettent d'illustrer la différence entre un masque chirurgical

ou un masque grand public et les appareils de protection respiratoire. Les deux premiers sont des masques destinés à protéger l'environnement des émissions de particules en provenance de leur porteur et n'intègrent donc pas d'exigences en termes de fuite alors que les derniers sont destinés à protéger leur porteur d'une pollution environnante et leur certification impose donc un niveau réduit de fuites. Cette distinction permet d'expliquer en grande partie les écarts entre les valeurs d'efficacité de contrôle à la source observées entre les catégories de masques même si des cas particuliers existent. Le masque Pv4 par exemple présente un coefficient d'ajustement proche de 100 alors que ses efficacités de contrôle à la source sont proches de celles d'un masque chirurgical.

L'analyse statistique des données regroupées par catégorie de masques a ainsi mis en évidence que l'efficacité de contrôle à la source des masques grand public était équivalente à celle des masques chirurgicaux vis-à-vis de particules de 1 µm et 3 µm et dans le cas d'une respiration normale. Les masques inclusifs n'ont pas de propriétés d'ajustement et peuvent même apparaître comme un dispositif de contrôle à la source intermédiaire entre l'écran facial et les masques en tissu. Parmi les différentes catégories testées, les masques FFP se démarquent avec des efficacités de contrôle à la source, en moyenne, plus élevées que celles de masques chirurgicaux et grand public. Ce résultat est valable aussi pour les masques FFP avec soupape expiratoire. Néanmoins, la variabilité des résultats d'efficacité de contrôle à la source au sein de chaque catégorie de masque, et notamment parmi les masques de type FFP, tempère ce résultat global. Les écarts importants d'efficacité de contrôle à la

Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

source, mesurés par exemple entre le masque P1 et le masque P2 d'une part, et entre les masques Pv1 et Pv4 d'autre part, rappellent que l'efficacité d'un masque FFP est étroitement liée au bon ajustement de celui-ci. Inversement, des modèles de masques grand public, comme le masque C3, peuvent aussi, avec des éléments d'ajustement pertinents, présenter une efficacité de contrôle à la source bien supérieure à celle de sa catégorie.

Les essais menés sur les masques réutilisables ne permettent pas de conclure à une recommandation de ce type de masque étant donnée la fragilité des sangles de serrage qui ne permet pas de garantir un maintien de la pose du masque dans le temps.

Les résultats obtenus dans cette étude avec le modèle de masque

P2 de « forme N95 » tant en termes d'efficacité de contrôle à la source que de coefficient d'ajustement sur sujet sont faibles. Des essais complémentaires sur l'ajustement de ce type de forme de masque de protection respiratoire avec fixation derrière les oreilles seraient à mener pour confirmer ces conclusions.

Cette étude présente cependant plusieurs limites. Les tests ont été réalisés sur une tête factice associée à une machine à respirer réglée sur trois niveaux de respiration. La configuration d'un sujet toussant n'a pas été étudiée. Les tailles de particules émises, 1 μm et 3 μm , font partie du spectre de taille des particules émises par une personne réelle lors de sa respiration mais ce spectre est beaucoup plus large. Les résultats ont été obtenus sur un échantillon de modèles de masques

qui pourrait être élargi notamment parmi les masques de type FFP pour lesquels les résultats présentent une grande variabilité.

Les résultats de l'efficacité du contrôle à la source montrent que, quel que soit le type de masque utilisé, celui-ci ne permet pas de supprimer totalement les émissions de particules microniques dans l'environnement d'une tête qui respire normalement. Ces résultats rappellent la pertinence du port généralisé du masque au sein d'un collectif pour réduire au maximum ces émissions. Ils imposent par ailleurs que l'utilisation d'un masque soit toujours accompagnée d'autres mesures préventives ; ventilation efficace des locaux, distanciation physique, lavage des mains et décontamination des surfaces.

POINTS À RETENIR

- L'efficacité de contrôle à la source des masques est différente et inférieure à l'efficacité de filtration du matériau qui constitue le masque.
- Le masque constituera une barrière d'autant plus efficace que son ajustement au visage sera bon.
- Les masques de type FFP bien ajustés présentent des efficacités de contrôle à la source très élevées.
- Aucun masque n'arrête toutes les particules émises par leur porteur. Le port du masque doit donc s'accompagner des autres mesures barrières (ventilation, distanciation, hygiène).

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | GEHANNO JF, BONNETERRE V, ANDUIAR P, PAIRON JC ET AL. - Arguments pour une possible transmission par voie aérienne du SARS-CoV-2 dans la crise COVID-19. *Arch Mal Prof Environ.* 2020 ; 81 (4) : 306-15.
- 2 | Masques « grand public » réservés à des usages non sanitaires. Note d'information du 29 mars 2020. Mise à jour du 28 janvier 2021. Ministère chargé de la Santé, des Finances et du Travail, 2021 (https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/note_interministre_ruelle_masques_grand_public_28_janvier_2021.pdf).
- 3 | Masques et prévention de la transmission de la Covid-19. Principaux usages. 2^e édition. Édition INRS ED 6392. Paris : INRS ; 2021 : 3 p.
- 4 | GUIMON M - Les appareils de protection respiratoire. Choix et utilisation. 5^e édition. Édition INRS ED 6106. Paris : INRS ; 2019 : 64 p.
- 5 | Appareils de protection respiratoire. Demi-masques filtrants contre les particules. Exigences, essais, marquage. Norme française homologuée NE EN 149 + A1. Septembre 2009. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2009 : 36 p.
- 6 | NIOSH 42 CFR Part 84. Approval of Respiratory Protective Devices. NIOSH, ECFR, 2004 (<https://www.ecfr.gov/current/title-42/chapter-I/subchapter-G/part-84>).
- 7 | Masques à usage médical. Exigences et méthodes d'essai. Norme française homologuée NF EN 14683 + AC. Août 2019. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2019 : 25 p.
- 8 | Masques barrières. Guide d'exigences minimales, de méthodes d'essais, de confection et d'usage. Fabrication en série et confection artisanale. AFNOR SPEC S76-001 : 2020. Mars 2020. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2020 : 36 p.
- 9 | VERMA S, DHANAK M, FRANKENFIELD J - Visualizing the effectiveness of face masks in obstructing respiratory jets. *Phys Fluids* (1994). 2020 ; 32 (6) : 061708.
- 10 | LINDSLEY WG, BLACHERE FM, LAW BF, BEEZHOLD DH ET AL. - Efficacy of face masks, neck gaiters and face shields for reducing the expulsion of simulated cough-generated aerosols. *Aerosol Sci Technol.* 2021 ; 55 (4) : 449 - 57.
- 11 | LINDSLEY WG, BLACHERE FM, BEEZHOLD DH, LAW BF ET AL. - A comparison of performance metrics for cloth masks as source control devices for simulated cough and exhalation aerosols. *Aerosol Sci Technol.* 2021 ; 55 (10) : 1125-42.
- 12 | BALTU I - Appareils de protection respiratoire et bioaérosols : quelle est l'efficacité des médias filtrants ? Point de repère PR 46. *Hyg Sécur Trav.* 2010 ; 221 : 53-61.
- 13 | Ergonomie de l'environnement thermique. Détermination du métabolisme énergétique. Norme française homologuée NF EN ISO 8996. Février 2005. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2005 : 30 p.
- 14 | CHAZELET S, PACAULT S - Efficiency of Community Face Coverings and Surgical Masks to Limit the Spread of Aerosol. *Ann Work Expo Health.* 2021 : 1-15 (en ligne avant impression).
- 15 | GUIMON M, CHAZELET S - Protection respiratoire. Réaliser des essais d'ajustement. 2^e édition. Édition INRS ED 6273. Paris : INRS ; 2021 : 18 p.
- 16 | CHAZELET S, BAYEUX-DUNGLAS MC, GUIMON M - Évaluation de l'ajustement des appareils de protection respiratoire de type pièce faciale filtrante (FFP) utilisés en milieu de soins. Vu du terrain TF 285. *Réf Santé Trav.* 2021 ; 165 : 53-62.
- 17 | ZHUANG Z, GROCE D, AHLERS HW, ISKANDER W ET AL. - Correlation between respirator fit and respirator fit test panel cells by respirator size. *J Occup Environ Hyg.* 2008 ; 5 (10) : 617-28.
- 18 | OBERG T, BROUSSEAU LM - Surgical mask filter and fit performance. *Am J Infect Control.* 2008 ; 36 (4) : 276-82.

ANNEXES

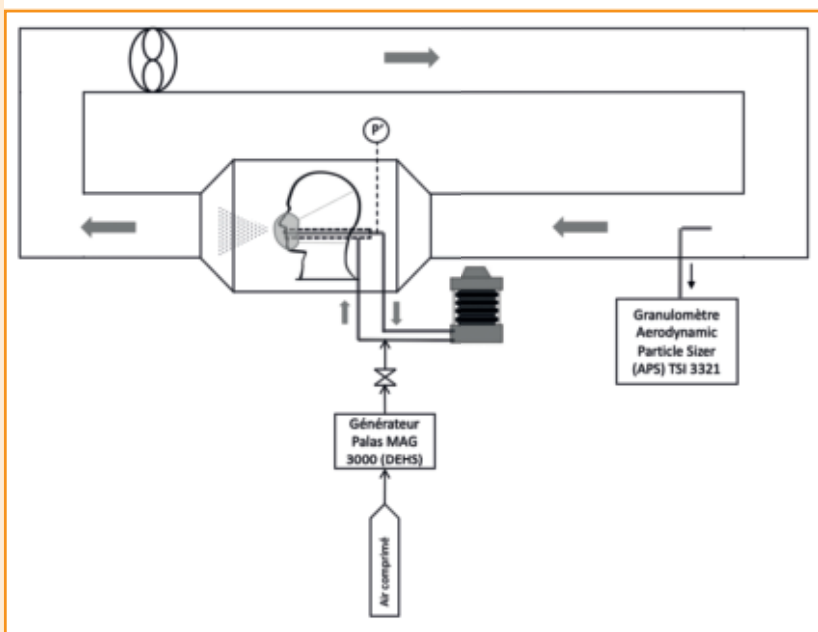


Comparaison de différents types de masques comme mesure barrière pour réduire les émissions

ANNEXE 1 Protocole opératoire pour la mesure de l'efficacité des masques à réduire les émissions d'un sujet source

Les mesures d'efficacité de contrôle à la source ont été réalisées sur une tête factice, positionnée au sein d'un banc d'essai à l'intérieur duquel circule un débit d'air calme (vitesse de circulation de l'air < 0,2 m/s). La figure A1 présente le schéma de principe du banc d'essai.

Figure A1 : Montage expérimental.



La tête factice est connectée à une machine à respirer (CBS *Sperian*) par deux tubes flexibles, l'un pour la circulation du flux inhalé et l'autre pour la circulation du flux exhalé. Des particules de Di-HethylHexylSebacate (DEHS) sont générées dans le flux exhalé de la tête factice par un

générateur de brouillard d'huile Palas MAG 3000. Ce générateur d'aérosol permet de générer des aérosols faiblement polydispersés. Deux conditions de réglage du générateur ont été choisies pour effectuer des mesures d'efficacité de contrôle à la source vis-à-vis d'aérosols de 1 µm (écart-type géométrique de 1,02 suivant une loi log-normale) dans un premier temps puis de 3 µm (écart-type géométrique de 1,09 suivant une loi log-normale) dans un second temps. Le choix de ces tailles de particules est guidé par la volonté de se rapprocher des conditions de test des médias filtrants seuls, précisés dans le paragraphe « *Les différents types de masques* » pp. 39-40.

Le choix d'un aérosol inerte plutôt que biologique repose d'abord sur la volonté d'utiliser la métrologie du comptage de particules dans des conditions stables. Ensuite, des travaux scientifiques ont mis en évidence depuis de nombreuses années l'équivalence entre l'évaluation de l'efficacité d'un matériau filtrant avec un aérosol inerte et un aérosol biologique de diamètre aérodynamique équivalent [12].

La machine à respirer permet de simuler différents cycles respiratoires sinusoïdaux. Leurs caractéristiques, présentées dans le tableau A I, sont choisies pour simuler des rythmes de travail léger

↓ Tableau A I

> CARACTÉRISTIQUES DES CYCLES RESPIRATOIRES GÉNÉRÉS PAR LA MACHINE À RESPIRER

Rythme respiratoire	Volume (L)	Fréquence (cycle/min)	Débit moyen ventilé (L/min)	Débit de pointe (L/min)
repos	1.5	8.6	13	41
activité moyenne	2.1	12.8	27	84
activité intense	2.1	21.4	45	141

(repos), modéré (respiration moyenne) ou intense (respiration intense), conformément à la norme ISO 8996 [13]. Pour déterminer le débit d'émission des particules, un prélèvement isocinétique est réalisé au moyen d'un *Aerodynamic Particle Sizer* (APS, TSI 3321) à une distance suffisamment importante de la source d'émission pour s'assurer de l'homogénéité de la concentration en aérosol sur la section du conduit. Cet appareil permet de mesurer la concentration en nombre de particules sur 51 canaux, compris entre 0,542 µm et 19,81 µm. La concentration totale en aérosol généré est la somme des concentrations en nombre mesurées :

- sur cinq canaux entre 0,965 µm et 1,286 µm pour l'aérosol centré à 1 µm de diamètre ;
- sur huit canaux entre 2,288 µm et 3,786 µm pour l'aérosol centré à 3 µm de diamètre.

En faisant les hypothèses que le dépôt des particules aux parois est négligeable et que l'air est parfaitement mélangé au point de prélèvement, le suivi au cours du temps de cette concentration en particules dans la veine permet de déterminer le débit d'émission des particules dans des conditions données.

La détermination de l'efficacité de contrôle à la source E_S repose ensuite sur la détermination du débit d'émission de particules en l'absence de masque ($Q_{g,0}$) et lorsque la tête porte un masque ($Q_{g,1}$) selon l'équation suivante :

$$E_S = 1 - \frac{Q_{g,1}}{Q_{g,0}}$$

Le protocole détaillé et sa validation sont présentés dans un précédent article [14].

Pour chaque modèle de masque, trois exemplaires sont testés à trois débits respiratoires et aux deux granulométries d'aérosols. Au total, dix-huit valeurs d'efficacité de contrôle à la source sont déterminées pour chaque modèle de masque. Des moyennes sont ensuite réalisées, par modèle de masque, pour chaque cycle respiratoire et pour chaque taille de particule. Compte tenu des caractéristiques communes des différents masques au sein de chaque catégorie de masques (masques grand public (C), masques inclusifs (I), masques chirurgicaux jetables (M), masques réutilisables (R) et masques de type FFP sans soupape (P) et

avec soupape (Pv)), ceux-ci ont été regroupés par catégorie pour l'analyse statistique.

Ces résultats de l'efficacité du contrôle à la source ont été analysés statistiquement à l'aide d'un modèle de régression linéaire mixte. Ce modèle comprend trois effets fixes principaux (catégorie de masque, taille des particules et débit respiratoire), les interactions de second ordre et un effet aléatoire « modèle de masque » (pour tenir compte de la variabilité au sein de chaque catégorie de masques). Lorsqu'une interaction entre deux facteurs est significative, l'effet simple de l'un des facteurs est testé à chaque niveau du second facteur (avec ajustement de Bonferroni en cas de comparaisons multiples). Le seuil de signification statistique a été fixé à 5 %.

ANNEXE 2 Protocole pour la réalisation des essais d'ajustement

Plusieurs protocoles existent pour déterminer l'ajustement d'un appareil de protection respiratoire. Ils sont décrits dans le guide ED 6273 [15]. Parmi les masques intégrés dans cette étude, seuls les masques notés P1, P2 et P_{v1} à P_{v4} sont des appareils de protection respiratoire. Néanmoins le même protocole sera appliqué à l'ensemble des masques pour pouvoir les comparer.

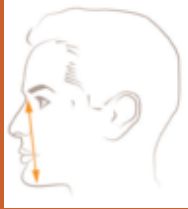

Le protocole choisi est un protocole quantitatif qui permet de mesurer un coefficient d'ajustement à partir de la mesure des concentrations en aérosol ambiant à l'intérieur et à l'extérieur d'un masque porté par un sujet d'essai au moyen d'un compteur de particules (Portacount, TSI). Le sujet effectue un certain nombre d'exercices au cours desquels l'ajustement est vérifié. Le coefficient d'ajustement déterminé sera d'autant plus élevé que l'ajustement du masque sera bon. Le critère de réussite à l'essai d'ajustement quantitatif pour un masque FFP est l'obtention d'un coefficient d'ajustement global supérieur ou égal à 100, en s'assurant que les coefficients d'ajustement pour chacun des exercices sont également supérieurs à 100 [15]. Ce protocole a été décrit plus en détail dans un précédent article [16].

Afin d'évaluer la variabilité des résultats en fonction de la pose du masque, le sujet réalise trois essais d'ajustement avec une nouvelle pose à chaque fois pour un même masque.

Six sujets ont été intégrés dans l'étude. Ils ont été choisis avec des dimensions de visage variables afin de représenter des physiologies courantes. En effet ce paramètre de dimensions du visage joue un rôle important sur l'ajustement [16]. Ces dimensions sont données dans le [tableau A II](#). Plusieurs catégories de visage définies à partir du *bivariate panel* du NIOSH [17] sont donc représentées dans ce panel.

↓ [Tableau A II](#)

> DIMENSIONS FACIALES DES SUJETS

N° sujet	Sexe	Longueur du visage	Largeur du visage	Catégorie du <i>bivariate panel</i> du NIOSH [17]
				
1	M	125	139	7
2	F	117	131	3
3	F	107	114	1
4	M	114	121	3
5	M	122	149	8
6	M	112	132	3