

# POINT DE REPÈRE

## APPAREILS DE PROTECTION RESPIRATOIRE ET BIOAÉROSOLS : QUELLE EST L'EFFICACITÉ DES MÉDIAS FILTRANTS ?

► Isabelle BALTHY,  
INRS, département Expertise et conseil technique

Depuis le milieu des années 80, une succession de menaces sanitaires (tuberculose, SRAS, bioterrorisme, pandémie grippale) conduisent les scientifiques à mener des études sur les moyens de protection respiratoire destinés aux soignants et aux autres travailleurs exposés à des bioaérosols. En s'appuyant sur les résultats de ces travaux, cet article répond aux questions souvent posées par les prescripteurs ou les utilisateurs de masques quant à leur efficacité et la prolifération possible des micro-organismes sur les filtres. Il présente également les travaux récents relatifs au développement de filtres biocides et de procédés d'inactivation de filtres contaminés.

**A**vant la recrudescence des cas de tuberculose aux États-Unis à partir de 1985, la question des moyens de protection respiratoire des personnels soignants ne se posait pas. Aucune recherche sur l'efficacité de ces moyens n'avait été menée. Les premières études sur le sujet n'allaient cependant pas tarder et en 1992, les Centers for Disease Control (CDC) américains ont recommandé le port de masques de protection respiratoire dans les milieux de soins pour prévenir cette maladie. Des recherches portant sur le développement des micro-organismes captés par les média filtrants et leur remise en suspension dans l'air ont aussi été réalisées.

Ces dernières années, les menaces d'attentats bioterroristes et la crainte de pandémies ont maintenu l'intérêt des scientifiques et des autorités sanitaires pour les questions de prophylaxie contre les agents biologiques transmissibles par l'air et, en particulier, les virus [1].

En France, la Direction générale de la santé a émis des recommandations officielles sur le port des masques pour la prévention d'infections telles que la tuberculose [2], le SRAS [3] ou la grippe aviaire [4]. Plus récemment, le port de masques lors de la prise en charge de malades ou d'activités en contact avec le public a été préconisé dans le plan national « Pandémie grippale » [5].

Dans ce contexte, plusieurs nouvelles études ont été conduites. Elles portent sur l'efficacité des médias filtrants vis-à-vis des virus, ceux incorporant des biocides, et sur les possibilités d'inactivation des micro-organismes par des procédés physiques ou chimiques.

En s'appuyant sur l'ensemble de ces études, cet article répond aux questions souvent posées par les prescripteurs ou les utilisateurs de masques sur leur efficacité et la prolifération possible des micro-organismes sur les filtres. En revanche, il n'aborde pas la question du choix de l'appareil de protection respiratoire en fonction des situations d'exposition.

## SITUATIONS PROFESSIONNELLES EXPOSANT À DES BIOAÉROSOLS

Les bioaérosols sont définis comme des particules solides ou liquides d'origine microbienne, animale ou végétale en suspension dans l'air. Les particules d'origine microbienne peuvent contenir des bactéries, des virus, des champignons microscopiques, des protozoaires, des fragments de ces agents biologiques ou des toxines provenant de ces agents biologiques (endotoxines, mycotoxines). Dans l'air, les micro-organismes peuvent se présenter sous forme d'agrégats ou d'organismes individualisés (spores fongiques, virus isolés...) et être associés à des particules d'origine non microbienne. Il est établi que les bioaérosols sont à l'origine d'infections et de pathologies immuno-allergiques ou toxiques [6].

Les bioaérosols peuvent provenir d'un être vivant. En éternuant ou en toussant, mais aussi en se mouchant voire, tout simplement, en parlant, les individus atteints d'infections des voies respiratoires émettent des gouttelettes chargées de micro-organismes. Elles sont de différentes tailles [7]. Les plus grosses (diamètre supérieur à 200 µm) sont peu nombreuses et sédimentent rapidement. Elles ne peuvent atteindre que les personnes situées à proximité (moins de 2 mètres). Les autres gouttelettes se dessèchent rapidement, en l'es-

pace de quelques dixièmes de seconde à plusieurs secondes, pour former des *droplet nuclei* (« noyaux de gouttelettes »), particules de taille inférieure à 5 µm. Les *droplet nuclei* se comportent comme des aérosols : ils peuvent rester en suspension dans l'air, être transportés sur des distances importantes, être inhalés et infecter une personne. On sait que la tuberculose se transmet ainsi sans nécessiter de contact rapproché avec un malade. La bactérie responsable de cette maladie, *Mycobacterium tuberculosis*, est résistante à la dessiccation ; sa dose infectante est faible (une dizaine de bactéries) et elle infecte des cellules situées dans les alvéoles pulmonaires.

Dans les établissements de santé, mis à part les soins aux patients, d'autres activités peuvent exposer les soignants aux bioaérosols comme les endoscopies bronchiques, les soins dentaires, la chirurgie au laser.

Les animaux peuvent également transmettre des infections par voie aérienne. C'est par exemple le cas de l'ornithose, due à l'inhalation de poussières de fientes d'oiseaux contaminés par la bactérie *Chlamydochloa psittaci*. L'environnement lui-même est parfois en cause : que l'on pense à la légionellose, causée par l'inhalation de gouttelettes d'eau contaminées par des *Legionella*.

En plus des infections, il existe des pathologies de type immuno-allergiques ou toxiques liées à l'exposition à des bioaérosols. Elles mettent en cause un « réservoir » inanimé dans lequel prolifèrent des moisissures, des bactéries et concernent notamment les métiers de l'assainissement (traitement des eaux usées...), du traitement des déchets (retournement d'andains de compost...), de l'agroalimentaire (travail en fromagerie, salaisonnerie...).

Pour prévenir le risque d'exposition à des bioaérosols, il convient en priorité de recourir à des mesures d'organisation du travail ou de protection collective. Le port du masque n'est qu'un complément. Cependant, lorsqu'il s'agit de prodiguer des soins à un malade atteint d'une infection transmissible par voie aérienne, les mesures de protection collective sont souvent difficiles à mettre en œuvre, d'où l'importance des dispositifs individuels de protection respiratoire pour les soignants.

## MÉDIAS FILTRANTS POUR APPAREILS DE PROTECTION RESPIRATOIRE, QUELLE EFFICACITÉ VIS-À-VIS DES BIOAÉROSOLS ?

Dès 1962, Green et Vesley ont proposé une méthode pour mesurer l'efficacité de filtration de masques chirurgicaux – alors conçus comme un moyen de protection du seul patient – basée sur le dénombrement des bactéries émises à travers le filtre par un sujet en train de parler [8]. Aujourd'hui, dans la norme européenne EN 14683 [9] relative aux masques chirurgicaux, l'examen consiste à exposer le matériau filtrant à un aérosol de *Staphylococcus aureus* de 3,0 µm de diamètre et à dénombrer le nombre de bactéries ayant franchi le filtre.

Il est apparu que ces masques n'étaient pas en mesure de capturer les aérosols de taille submicronique émis, par exemple, lors de l'utilisation de lasers chirurgicaux ou de bistouris électriques [10]. En outre, ils présentent une fuite au visage relativement élevée en comparaison des masques de protection respiratoire et de ce fait n'empêchent pas l'inhalation de particules solides ou liquides. En conséquence, une étude récente de l'université de Minneapolis conclut à bon droit que les masques chirurgicaux ne peuvent et ne doivent pas être considérés comme des appareils de protection respiratoire [11].

Aux Etats-Unis, rappelons-le, le port de masques de protection respiratoire par les soignants a d'abord été recommandé pour lutter contre la tuberculose. Il restait à déterminer leur efficacité. Si la capture des particules par un filtre anti-aérosols repose sur des mécanismes physiques (cf. Encadré 1), des questions se posaient quant à l'influence des caractéristiques propres aux aérosols de micro-organismes (forme, diamètre aérodynamique...). Plusieurs études ont ainsi été conduites avec des aérosols de bactéries non pathogènes simulant *M. tuberculosis*<sup>1</sup> afin de mettre au point des méthodes d'essai et de comparer les différents médias filtrants existants sur le marché.

<sup>1</sup> Cette bactérie mesure entre 2 à 5 µm de long pour 0,3 µm de large.

## ENCADRÉ 1

## Mécanismes physiques intervenant dans la filtration des particules

Dans un appareil de protection respiratoire, le média filtrant est constitué d'un réseau de fibres qui offre une faible résistance au passage de l'air et permet aux particules de pénétrer dans ce réseau. Elles sont capturées selon différents mécanismes physiques, les principaux étant la diffusion brownienne, l'interception directe, l'impaction inertielle et les forces électrostatiques [42, 43]. Les mécanismes prépondérants sont différents selon la taille des particules : les plus grandes seront filtrées par interception et impaction alors que les plus petites le seront par diffusion brownienne. La courbe d'efficacité de collecte en fonction de la taille des particules (cf. Figure 1) montre clairement qu'il y a un domaine de taille pour lequel l'efficacité de filtration est minimale. Cette taille de particule est appelée MPPS, en anglais, Most Penetrating Particle Size (taille de la particule la plus pénétrante). Sa valeur dépend notamment des caractéristiques du média filtrant ; dans le domaine des filtres utilisés en protection respiratoire, elle se situe autour de 0,3  $\mu\text{m}$  pour les filtres neutres et entre 50 à 100 nm pour les filtres électrostatiques (cf. Figure 2).

FIGURE 1

Variation de l'efficacité de capture des aérosols en fonction de leur diamètre

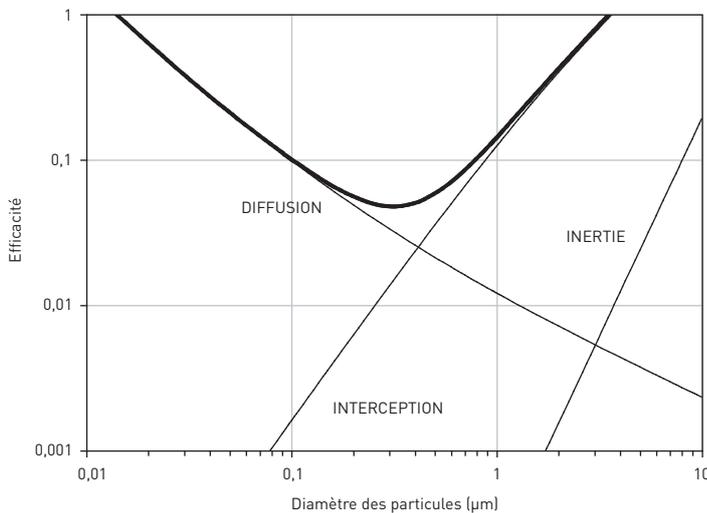
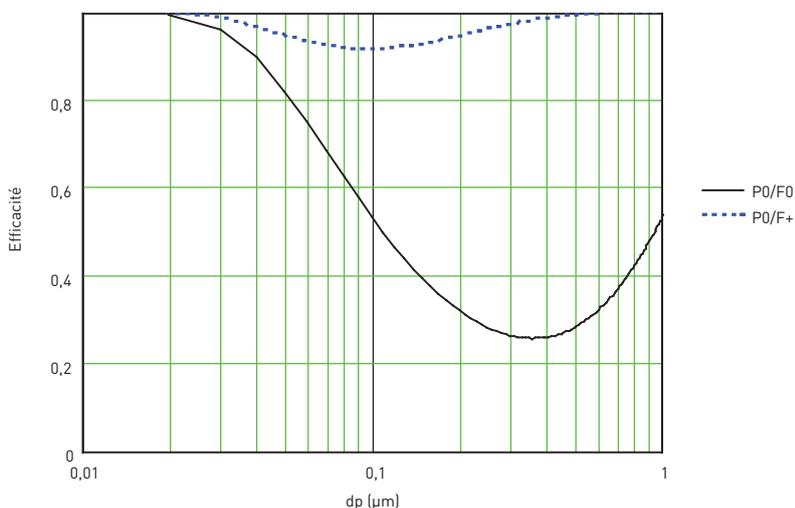


FIGURE 2

Efficacité de filtration d'un média à fibres neutres (FO) et d'un média à fibres électrostatiques (F+) vis-à-vis des particules neutres (PO)



Une équipe de l'École de santé publique de Minneapolis a comparé la filtration sur des médias en fibres de verre d'un aérosol de *Mycobacterium chelonae* (bacille<sup>2</sup> utilisé comme substitut de *M. tuberculosis*) de diamètre médian 0,8  $\mu\text{m}$  et d'un aérosol monodispersé de billes de latex de polystyrène (PSL) de même diamètre aérodynamique<sup>3</sup> [12]. La pénétration<sup>4</sup> du bioaérosol était évaluée soit par dénombrement de particules à l'aide d'un Aerodynamic Particle Sizer (APS), soit par dénombrement des bactéries viables cultivables avec un impacteur Andersen. La pénétration de *M. chelonae* était la même, qu'elle soit mesurée avec l'APS ou l'impacteur Andersen. Elle équivalait en outre à la pénétration de l'aérosol de PSL. À la même époque, l'équipe anglaise du Health and Safety Executive (HSE), en utilisant un autre dispositif expérimental et d'autres aérosols bactériens, était arrivée aux mêmes conclusions que les études américaines [13]. Ces résultats ont confirmé qu'il était possible d'utiliser un aérosol inerte au lieu d'aérosols biologiques pour évaluer les matériaux filtrants vis-à-vis d'aérosols biologiques, car sur le plan physique, les aérosols biologiques se comportent de la même façon que les aérosols sans activité biologique de diamètre aérodynamique équivalent.

Une équipe du département de santé environnementale de Cincinnati a étudié l'influence de la forme du micro-organisme sur la pénétration du média filtrant (un masque chirurgical et un masque anti-poussières) à l'aide d'un troisième dispositif expérimental, les micro-organismes étant dénombrés au moyen d'un APS [14]. Ces derniers étaient *Streptococcus salivarius*, de forme ronde, et trois bacilles de rapport longueur/largeur différents : *Bacillus megatherium* (rapport 2,6), *Pseudomonas fluorescens* (rapport 3,0), substitut de *M. tuberculosis*, et *Bacillus alcalophilus* (rapport 4,4). La pénétration des bacilles était plus faible que celle du streptocoque. Pour un diamè-

<sup>2</sup> Un bacille est une bactérie en forme de bâtonnet.

<sup>3</sup> Comme les particules ne sont pas toutes sphériques, il est parfois difficile de définir la taille d'une particule. C'est pourquoi on utilise la notion de diamètre aérodynamique. Un diamètre aérodynamique égal à 1  $\mu\text{m}$  signifie que la particule se meut dans un gaz comme une sphère de densité de 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  et de diamètre 1  $\mu\text{m}$ .

<sup>4</sup> La pénétration désigne la quantité de particules qui n'est pas retenue par le filtre.

tre aérodynamique donné, elle diminuait lorsque le rapport longueur/largeur augmentait. En effet, la surface des bactéries non sphériques est plus importante que celle des bactéries sphériques, avec pour conséquence une augmentation des forces d'interception et des forces électrostatiques intervenant dans la filtration.

La pénétration de *P. fluorescens* était moitié moindre que celle du streptocoque. Les auteurs en ont déduit qu'un filtre efficace à 90 % lors d'un essai avec des particules inertes sphériques serait efficace à 95 % contre *M. tuberculosis*. Il s'agissait d'un facteur à prendre en compte dans l'estimation du risque d'exposition à un agent infectieux. Ce n'est pas la masse totale d'unités infectieuses traversant le filtre qui importe mais leur nombre, en particulier quand il s'agit de micro-organismes ayant une dose infectante de quelques unités.

L'équipe de Minneapolis était parvenue à des résultats similaires en montrant que *M. chelonae* pénétrait légèrement moins que les particules sphériques de latex de polystyrène [15]. Néanmoins, lors d'une autre étude, cette même équipe était arrivée à des résultats inattendus, le bacille *Bacillus subtilis* pénétrant davantage qu'une bactérie de forme ronde de même diamètre aérodynamique : *Staphylococcus epidermidis* [16]. Ces chercheurs ont constaté que la bactérie qui pénétrait le plus variait en fonction de la catégorie de filtre testé, du fait de la part plus ou moins importante de la filtration électrostatique. Ils ont supposé que le seul diamètre aérodynamique ne permettait pas de prédire la pénétration de particules non sphériques.

Ces équipes américaines ont aussi étudié l'influence du débit respiratoire. L'augmentation de 50 à 80 l/min du débit d'aspiration à travers le média filtrant accroissait la pénétration de *P. fluorescens* [14] ; il en allait de même pour un aérosol de *Mycobacterium abscessus* avec un débit passant de 45 à 85 l/min [17]. Toutefois, une autre étude portant sur *M. abscessus*, *B. subtilis* et *S. epidermidis* confirmait l'influence du débit pour les bacilles, mais pas pour *S. epidermis*. [18].

La question de l'efficacité des masques de protection respiratoire vis-à-vis des aérosols viraux s'est posée avec acuité après l'apparition du SRAS en 2002 et la menace de pandémie grippale, car les virus sont des particules bien plus

petites que les bactéries et mesurent de 20 à 200-300 nm.

Le département de santé environnementale de Cincinnati a réalisé des essais sur deux modèles de masques N95<sup>5</sup> avec un aérosol du bactériophage MS2 (particules entre 10 et 80 nm avec un pic à 30 nm correspondant à la taille d'un virus isolé). Un Wide Range Particle Spectrometer (WPS) a permis de dénombrer les particules. L'examen de la courbe de pénétration en fonction de leur taille a montré qu'un des masques avait une efficacité légèrement inférieure à 95 % pour les particules comprises entre 30 et 80 nm et que la pénétration maximale avait lieu pour 50 nm [19]. Dans une précédente étude réalisée avec un aérosol de chlorure de sodium (NaCl), les mêmes auteurs avaient montré que, pour des masques N95, la MPPS<sup>6</sup> se situait entre 30 et 70 nm parce qu'ils étaient majoritairement constitués de filtres électrostatiques [20]. La MPPS ne correspondait pas à la valeur de 300 nm établie pour les filtres mécaniques et retenue dans les méthodes normalisées d'évaluation des masques. Les résultats obtenus avec des aérosols de NaCl dans une autre étude menée par la même équipe selon la méthode de l'OSHA<sup>7</sup> pour déterminer les facteurs de protection de masques N95 [21] ainsi que l'étude de l'équipe du NIOSH<sup>8</sup> [22] ont corroboré cette conclusion.

L'équipe de Cincinnati a complété les essais réalisés avec le virus MS2 en soumettant un masque N95 et deux masques N99 à des aérosols de NaCl et à des aérosols de virus de formes et de tailles différentes (les bactériophages MS2 et T4 et un phage de *B. subtilis*) [23]. Les résultats ont montré que dans tous les cas la MPPS était inférieure à 100 nm et que l'efficacité de filtration du N95 s'approchait de celle des masques N99, dans la gamme des aérosols d'essai (20 à 500 nm). De plus, les résultats avec l'aérosol de NaCl étaient comparables à ceux obtenus avec des aérosols de virus de dimensions voisines. Les aérosols de NaCl pouvaient donc être utilisés pour tester la pénétration des virus.

En définitive, l'ensemble de ces études montre que la nature de l'aérosol employé pour les tests de filtration importe moins que les caractéristiques physiques des particules. Qu'il s'agisse de bioaérosols de bactéries, de virus ou d'aérosols sans activité biologique,

les résultats sont très comparables. Il est parfaitement possible d'utiliser des aérosols inertes pour qualifier les classes de performance des filtres vis-à-vis des bioaérosols lors d'essais normalisés.

## DES PARTICULES INFECTIEUSES PEUVENT-ELLES ÊTRE ÉMISES PAR UN FILTRE ?

Dans le cadre de la protection des soignants contre la tuberculose, la question de l'émission d'agents infectieux par les médias filtrants se posait. S'agissant d'un agent infectieux ayant une dose infectante de quelques unités, il suffirait que quelques micro-organismes collectés dans un masque soient remis en suspension dans l'air, par exemple à la suite d'un éternuement ou d'une toux violente pour qu'ils contaminent quelqu'un.

Des chercheurs de l'Université de Cincinnati ont évalué la remise en suspension dans l'air de particules inertes et de particules biologiques collectées par des masques N95 [24]. Les filtres étaient chargés avec des aérosols de NaCl, de billes de latex de polystyrène ou de bacilles *B. subtilis* ou *B. megatherium* (substitués de *M. tuberculosis*) puis soumis en sens inverse à une vitesse d'air variable allant jusqu'à 300 cm/s, valeur correspondant à une toux ou un éternuement violent. À une vitesse

<sup>5</sup> Aux Etats-Unis, les filtres de protection respiratoire doivent être certifiés conformes à la norme 42 CFR 84 de 1995 par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Les filtres N95 filtrent au minimum 95 % des particules d'un aérosol d'essai dont le diamètre moyen est 0,3 micron, les filtres N 99 en retiennent 99 % et les filtres N100 près de 100 %. Les filtres de la classe N peuvent être utilisés en présence de contaminants solides exempts d'huile. Il existe aussi deux autres classes de filtres, R (pour une journée) et P (pour une utilisation prolongée), s'il y a présence d'huile dans l'air.

<sup>6</sup> Most Penetrating Particle Size.

<sup>7</sup> Occupational Safety and Health Administration.

<sup>8</sup> National Institute for Occupational Safety and Health.

correspondant à une respiration normale, aucune particule n'était réémise. À une vitesse de 300 cm/s, avec une humidité relative de 22 % représentative des conditions régnant dans des environnements intérieurs, la remise en suspension était insignifiante (moins de 0,025 %) pour les particules inférieures à 1,0 µm, quelle que soit leur nature. Elle n'avait lieu que pour les particules les plus grosses (1 % des particules de 3 µm et 6 % des particules de 5 µm).

On peut en conclure que l'air exhalé étant saturé de vapeur d'eau, un média filtrant présente un niveau d'humidité relative plus élevé que l'air ambiant. En situation réelle, la remise en suspension dans l'air de micro-organismes est insignifiante.

Après les attentats bioterroristes aux spores de charbon (*Bacillus anthracis*) survenus aux États-Unis en 2001, une équipe de l'École de santé publique de Los Angeles s'est intéressée à la possibilité de remise en suspension de particules retenues par les N95 lors de leur manipulation [25]. Lors de l'essai, les masques, préalablement chargés avec des billes de latex de polystyrène d'1 µm simulant des spores, tombaient d'une hauteur de 0,91 m sur un tamis rigide. Les résultats ont fait apparaître que seule une petite fraction (0 à 0,5 %) des particules pouvait être ainsi remise en suspension. Les auteurs estimaient que ces quelques particules pourraient représenter un risque en situation réelle, s'agissant de spores d'un micro-organisme dont la dose infectante est très faible et qu'il convenait de manipuler les masques usagés avec précaution.

## BACTÉRIES ET MOISSURES PEUVENT-ELLES SURVIVRE ET SE DÉVELOPPER SUR LES MÉDIAS FILTRANTS ?

Dans les milieux de soins, l'usage unique fait partie des recommandations concernant l'utilisation des masques de protection respiratoire. Cependant, dans un contexte d'épidémie ou de pandémie, une pénurie de masques jetables (Cf. Figure 3) est à craindre si bien que leur réutilisation est à envisager.

FIGURE 3

Exemples de masques de protection respiratoire jetables



Photos : © Gaël Kerbaol pour l'INRS



Et qu'en est-il des masques réutilisables à cartouche employés dans d'autres secteurs d'activité ? Si des micro-organismes peuvent survivre ou même se développer sur les filtres, ils pourraient induire des risques par contact cutané avec le filtre contaminé ou par inhalation de particules remises en suspension dans l'air. En effet, la plupart des micro-organismes se développant sur les filtres seraient attachés les uns aux autres et non au média filtrant et pourraient être plus facilement remis en suspension dans l'air.

Plusieurs études [26 - 31] ont été menées sur ce sujet. Elles ne sont toutefois pas représentatives des conditions réelles d'utilisation puisque les quantités de bactéries chargées sur les filtres étaient bien supérieures à celles des masques des soignants.

Une équipe de l'armée américaine a ainsi exposé différents masques de protection respiratoire (N95 et P100) à un aérosol d'une souche de *M. tuberculosis* H37 Ra non pathogène puis prélevé les bactéries présentes à la surface des filtres afin d'évaluer leur survie dans le temps [26]. Entre les prélèvements, les masques étaient rangés à température ambiante dans un sac étanche. Après un jour, on notait une décroissance très importante du nombre de *M. tuberculosis* cultivables sur l'extérieur des filtres et après 7 jours, il n'y avait plus de bacille cultivable.

Des essais ont été conduits à l'uni-

versité de Minneapolis en chargeant des filtres avec des aérosols de *M. abscessus*, *S. epidermidis*<sup>9</sup> et de spores de *B. subtilis*, trois bactéries ayant des résistances différentes à la dessiccation, car l'humidité relative est un facteur critique pour la croissance des bactéries [27]. Les filtres étaient stockés pendant 5 jours à 85 % d'humidité relative afin de simuler le stockage dans un sac fermé juste après utilisation. La survie des bactéries, recueillies par contact ou par élution, était évaluée par leur cultivabilité. Celle-ci était faible quoique des différences notables distinguaient les 3 bactéries : 98 % des filtres chargés avec *B. subtilis* montraient la présence de bactéries cultivables, comparés à *S. epidermidis* (61 %) et *M. abscessus* (20 %).

Le département de santé environnementale de Cincinnati a étudié la croissance de *M. smegmatis* (un substitut de *M. tuberculosis*) sur des filtres N95 stockés pendant 1 à 9 jours dans des conditions idéales pour la croissance des mycobactéries (37°C, 85 % d'humidité relative) [28]. Les filtres étaient préalablement chargés avec des aérosols de bactéries cultivées dans trois conditions d'apport de nutriments différentes. Les bacilles étaient ensuite extraits des filtres par élution. Les résultats ont

<sup>9</sup> Chez certaines bactéries, les spores constituent une forme de résistance à des conditions environnementales difficiles, comme par exemple chez *Bacillus anthracis* ou *Bacillus subtilis*

montré que la concentration de *M. smegmatis* dans les filtres restait constante, c'est-à-dire que cette bactérie n'était pas capable de s'y multiplier. Sa cultivabilité était très faible (moins de 0,08 %) et diminuait au fil des jours. Elle n'était plus détectable après un jour pour les bacilles préparés sans nutriment, au bout de 3 jours pour ceux qui avaient été cultivés avec de la salive humaine et au bout de 6 jours pour ceux bénéficiant d'un milieu de culture adapté. Dans un second essai, les filtres étaient chargés avec un aérosol de *M. smegmatis* puis soumis à un débit d'aspiration constant simulant le port du masque pendant 2 heures. La survie de *M. smegmatis* sur les filtres n'en était pas modifiée.

La même équipe a répété ces expériences avec d'autres bactéries : *B. subtilis* résistante aux conditions environnementales et *P. fluorescens* sensible au stress [29]. Aucune de ces bactéries n'a été capable de pousser sur les filtres N95. *P. fluorescens* a perdu sa viabilité en moins de 3 jours, alors que *B. subtilis* a conservé une partie de sa viabilité jusqu'au 13<sup>e</sup> et dernier jour de l'essai.

Les résultats montrent que les bactéries telles que *M. tuberculosis* survivent difficilement sur les médias filtrants. Dans les milieux de soins, la réutilisation des masques de protection respiratoire à usage unique, dans la limite de la durée maximale d'utilisation préconisée par le fabricant, peut donc être envisagée en cas de pénurie, à condition de respecter les bonnes pratiques d'hygiène.

Dans certains secteurs professionnels, des travailleurs peuvent être exposés à des bioaérosols dans des atmosphères humides, riches en moisissures et en bactéries, qui ne se rencontrent pas dans les milieux de soins.

Des chercheurs finlandais ont chargé un filtre P3, constitué de 85 % de fibres de verre et de 15 % de cellulose, et un autre filtre P3, composé de 85 % de cellulose et 15 % de fibres de verre, dans une étable (pendant 2 semaines, 8 h par jour) et dans une station d'épuration d'eaux usées (pendant 1 semaine en continu), deux environnements riches en micro-organismes [30]. Après une incubation de 35 jours à une humidité relative de 98 %, un développement microbien s'est produit. Pour le filtre composé de 85 % de cellulose chargé dans une étable, ils ont observé une prolifération de moisissures à l'intérieur

du filtre ainsi qu'une pénétration très importante de particules constituées essentiellement de spores fongiques d'*Aspergillus* et de *Penicillium* lors d'un essai de filtration. Les chercheurs expliquent ce phénomène par le développement des moisissures à travers le filtre, celles-ci relarguant leurs spores du côté de la face interne du filtre. Le stockage dans un lieu très humide pourrait donc conduire à une importante contamination des filtres, surtout s'ils sont constitués de matériaux biodégradables. Cette même équipe a également observé la croissance et la production de toxines de la moisissure *Stachybotrys atra* déposée sur des filtres P3 de même composition que ceux utilisés dans l'étude précédente, après 86 jours d'incubation [31]. *S. atra* est un champignon microscopique dégradant la cellulose qui croît entre 2 et 40°C dans des conditions d'humidité très élevée et peut produire, dans certaines conditions, des toxines. *S. atra* ne s'est développé que sur le filtre comportant 85 % de cellulose. À une humidité relative comprise entre 84 et 89 %, il a légèrement poussé, mais n'a pas produit de toxines. En revanche, à 100 % d'humidité relative, *S. atra* s'est fortement développé et a produit une toxine, la *saratoxine H*. La croissance du champignon et la production de toxines n'ont donc eu lieu que sur des filtres ayant une teneur élevée en cellulose et dans des conditions d'humidité extrêmes.

Dans une situation de travail très humide, les consignes d'utilisation et de stockage des filtres devraient prendre en compte la possibilité d'une prolifération de moisissures.

## PROCÉDÉS D'INACTIVATION DES AGENTS BIOLOGIQUES APPLICABLES AUX MASQUES DE PROTECTION RESPIRATOIRE

La perspective d'une pandémie grippale due à un virus très pathogène doublée d'une pénurie possible de masques de protection respiratoire jetables ont convaincu certains organismes d'étudier plusieurs méthodes

de décontamination des masques avant réutilisation. Elles devaient réunir trois critères essentiels : inactiver le virus, être sans danger pour l'utilisateur, ne pas endommager le masque.

Des scientifiques américains du NIOSH ont cherché à savoir si les différentes méthodes physiques ou chimiques d'inactivation des virus avaient un effet sur l'efficacité de filtration des masques de deux modèles classés N95 et P100 [32].

L'autoclavage, la chaleur sèche à 160°C, l'isopropanol à 70 % et le trempage dans de l'eau savonneuse ont dégradé de manière significative les filtres, ceux-ci n'étant plus conformes à la norme après l'essai de filtration. L'eau de Javel, la chaleur sèche à 80°C, l'oxyde d'éthylène et les micro-ondes ont également réduit les performances des masques, mais ceux-ci sont néanmoins restés conformes. Les méthodes qui avaient le moins d'impact sur la filtration étaient le peroxyde d'hydrogène sous forme vaporisée et les radiations ultra-violettes germicides. Ces travaux ont été poursuivis sur neuf modèles de masques en s'intéressant au comportement des matériaux et aux sous-produits potentiellement néfastes pour les utilisateurs [33]. Les UV, l'oxyde d'éthylène et le peroxyde d'hydrogène semblaient les méthodes les plus prometteuses, mais les résultats étaient variables selon le modèle de masque. Il reste à évaluer l'efficacité de ces méthodes sur l'inactivation d'agents infectieux collectés par des filtres et à étudier l'effet de décontaminations répétées sur les performances des masques.

Les méthodes d'essai normalisées disponibles servant à évaluer l'efficacité d'une décontamination microbiologique ne sont applicables qu'à des surfaces ou à des milieux liquides. Il n'en existe pas pour les matériaux perméables à l'air, comme les médias filtrants utilisés dans les masques. C'est pourquoi la même équipe a développé un dispositif d'essai permettant de charger un média filtrant avec un aérosol viral et a établi un protocole de vérification de l'efficacité d'une méthode de décontamination, testé avec l'eau de Javel et les UV [34, 35].

## DÉVELOPPEMENT DE FILTRES CONTENANT UN BIOCIDÉ

Des travaux de développement de médias filtrants incorporant un produit biocide sont en cours. Certains modèles ont récemment fait leur apparition sur le marché.

Une étude démontre l'activité biocide de masques chirurgicaux dont la surface externe est revêtue de nanoparticules de nitrate d'argent et de dioxyde de titane [36]. Cette activité est mesurée selon la méthode AATCC<sup>10</sup> 100-1999, dans laquelle le matériau à tester est contaminé par une suspension bactérienne de *Staphylococcus aureus* ou de *Escherichia coli* puis incubé à 37°C pendant 24 heures.

Des chercheurs de l'université de Floride ont étudié l'efficacité de filtres traités avec une résine iodée. Les bactéries, chargées négativement, sont attirées par les charges positives de la résine. Lors du contact, l'iode est libéré et provoque une oxydation des protéines des parois et membranes qui cause l'inactivation microbienne. Les résultats ont montré que l'efficacité de filtration était très élevée et qu'elle n'était pas différente de celle des filtres non traités, que ce soit pour un aérosol de particules inertes ou pour un bioaérosol de bactéries [37, 38]. La viabilité des spores de *B. subtilis* capturées par les filtres puis extraites en solution était très faible mais la fraction survivante<sup>10</sup> dans le filtre traité était significativement plus faible (environ 0,01 %) que celle du filtre non traité (environ 0,1 %) à température ambiante de 23°C et à basse humidité relative de 35 % [38]. Pour une humidité élevée de 95 %, à 23°C ou 40°C, la fraction survivante était très faible (environ 0,1 %), que le filtre soit traité ou non. Du fait de l'hydrolyse de l'iode, l'efficacité du filtre iodé sur les spores de *B. subtilis* a diminué à humidité élevée. Les chercheurs du NIOSH ont évalué l'efficacité de ce matériau filtrant iodé et de trois autres matériaux utilisant des technologies antimicrobiennes basées respectivement sur l'action de l'association argent-cuivre, de l'oxyde de titane et de l'ozone sur un virus non enveloppé<sup>11</sup> résistant aux biocides, le virus MS2 [39]. L'efficacité virucide dépend des conditions de température et d'humidité

et du biocide incorporé dans le filtre. Dans des conditions proches de celles d'un environnement intérieur (22°C, 30 % d'humidité relative), la réduction de la charge virale est similaire sur les différents filtres traités et sur le filtre témoin non traité. En revanche, dans des conditions équivalentes à celles de la zone respiratoire du porteur d'un masque (37°C, 80 % HR), le filtre iodé montre une plus grande efficacité virucide qu'à faible humidité relative et cette efficacité est supérieure à celle des autres filtres. En considérant ces deux études, il apparaît que l'augmentation de l'humidité relative a des effets opposés sur l'inactivation du virus MS2 et des spores de *B. subtilis*.

Dans ces études, l'efficacité biocide du filtre n'a été évaluée que sur les micro-organismes retenus par le filtre, exposés pendant plusieurs heures à un biocide. Il n'y a pas eu de mesure de l'effet biocide du filtre sur les quelques micro-organismes qui le traversent dans un temps très court (quelques millisecondes). L'équipe de l'université de Cincinnati a, quant à elle, développé un protocole d'essai permettant de différencier, pour un bioaérosol, la pénétration totale des particules de la pénétration de particules viables [40]. Leurs résultats sur des filtres P95 traités avec une résine iodée soumis à un aérosol de virus MS2 montrent que l'effet virucide n'est pas détectable sur les virus traversant le filtre.

La question de la survie des micro-organismes mise à part, il conviendrait aussi de s'interroger sur l'innocuité des produits biocides incorporés aux filtres de protection respiratoire, que ces derniers soient neufs ou qu'ils aient subi un vieillissement naturel. En ce qui concerne les filtres traités avec une résine iodée, l'université de Cincinnati a déterminé que la quantité d'iode émise par un filtre soumis à une aspiration à débit constant de 42,5 l/min est égale à 4 % de la valeur limite de l'ACGIH et de l'OSHA [40].

## DÉVELOPPEMENT DE FILTRES CAPTURANT PLUS EFFICACEMENT LES BIOAÉROSOLS

Les micro-organismes présentent une charge électrique négative. Des travaux publiés récemment montrent que des filtres constitués de nanofibres d'aluminium chargées positivement épurent plus efficacement un aérosol viral de MS2 tout en ayant une résistance respiratoire nettement plus faible [41]. Ces filtres restent performants quelle que soit l'augmentation de l'humidité relative (tests à 35 %, 50 % et 75 % HR), contrairement à ce qu'on observe pour les filtres électrostatiques traditionnels.

## CONCLUSION

Les études menées sur l'efficacité des filtres de protection respiratoire vis-à-vis des bioaérosols ont montré que :

- les résultats des essais de filtration effectués avec un bioaérosol sont comparables à ceux qui sont obtenus avec un aérosol de particules inertes de diamètre aérodynamique équivalent. Les méthodes d'essai normalisées utilisant des aérosols inertes peuvent donc être utilisées pour qualifier les classes de performance des filtres vis-à-vis des bioaérosols ;

- dans les conditions d'humidité relative rencontrées en situation réelle, la remise en suspension de bactéries capturées par un média filtrant est insignifiante. De plus, les bactéries ne sont pas capables de se multiplier sur un tel support. Seules les plus résistantes d'entre elles peuvent y survivre quelques jours ;

<sup>10</sup> Rapport entre la concentration des agents biologiques collectés survivants sur la concentration totale des agents collectés par le filtre.

<sup>11</sup> On distingue les virus enveloppés et les virus nus (ou non enveloppés) selon qu'ils possèdent ou non une enveloppe lipidique. Cette enveloppe leur confère une fragilité vis-à-vis des biocides.

■ dans des conditions d'humidité très élevée, des moisissures sont susceptibles de se développer à l'intérieur des filtres composés majoritairement de cellulose, et des spores peuvent être émises. Dans une situation de travail très humide, les consignes d'utilisation et de stockage des filtres devraient prendre en compte cette éventualité ;

■ il existe des procédés d'inactivation des micro-organismes applicables aux masques jetables, sans que leurs performances de filtration tombent en-dessous des valeurs normalisées. Néanmoins, leur efficacité biocide reste à évaluer ;

■ des médias filtrants contenant un biocide apparaissent sur le marché. L'activité biocide de ces produits apparaît très limitée sur les micro-organismes retenus par le filtre. Elle n'est pas mesurable sur la très faible fraction des micro-organismes traversant le filtre ;

Si l'efficacité de la protection respiratoire des utilisateurs dépend de l'efficacité des filtres, il ne faut pas oublier qu'elle est également fortement tributaire de l'étanchéité du masque au visage. Le choix de l'appareil de protection respiratoire et la formation pratique des utilisateurs à son port sont donc

essentiels, comme dans toutes les situations de travail qui exigent le port d'un tel équipement.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] RENGASAMY A., ZHUANG Z., BERRYANN R. – Respiratory protection against bioaerosols : Literature review and research needs. *American Journal of Infection Control*, 2004, vol. 32, n° 6, pp. 345-354.

[2] Avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section maladies transmissibles, relatif au choix d'un masque de protection contre la tuberculose en milieu de soins (séance du 14 mars 2003) (texte non paru au J.O.).

[3] Direction générale de la santé – *Conduite à tenir pour la prise en charge des personnes présentant un syndrome ou suspicion de syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) et des personnes contacts*. Protocole révisé à la date du 06 avril 2004. [http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/pneumopathies/protoc\\_060404.pdf](http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/pneumopathies/protoc_060404.pdf)

[4] Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section des maladies transmissibles – *Conduite à tenir lors d'une exposition à des volailles ou d'autres oiseaux atteints d'influenza aviaire à virus hautement pathogène et à risque établi de transmission humaine sur le territoire national*. Séance du 23 juin 2006. [http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/grippe\\_aviaire/protocole.pdf](http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/grippe_aviaire/protocole.pdf) (lien à revoir)

[5] Secrétariat général de la défense nationale – *Plan national de prévention et de lutte « Pandémie grippale »*. 2009, [http://www.pandemie-grippale.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN\\_PG\\_2009.pdf](http://www.pandemie-grippale.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_PG_2009.pdf)

[6] LE BACLE C. – Les risques biologiques en milieu de travail. Point de repère PR 28. *Hygiène et sécurité du travail Cahiers de notes documentaires*, 2007, n° 207, pp.85-96.

[7] CHAO C.Y.H., WAN M.P., MORAWSKA L., JOHNSON G.R., RISTOVSKI Z.D., HARGREAVES M., Mengersen K., CORBETT S., LI XIE X., KATOSHEVSKI D. – Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science*, 2009, vol. 40, pp. 122-133.

[8] GREEN V.W., VESLEY D. – Method for evaluating effectiveness of surgical masks. *Journal of Bacteriology*, 1962, vol. 83, pp. 663-667.

[9] NF EN 14683 – Masques chirurgicaux. Exigences et méthodes d'essai. AFNOR, 2006.

[10] CHEN C.-C., WILLEKE K. – Aerosol penetration through surgical masks. *American Journal of Infection Control*, 1992, vol. 20, n° 4, pp.177-184.

[11] OBERG T., BROSSEAU L.M. – Surgical mask filter and fit performance. *American Journal of Infection Control*, 2008, vol. 36, n° 4, pp.276-282.

[12] BROSSEAU L.M., CHEN S-K., VESLEY D., VINCENT J.H. – System design and test method for measuring respirator filter efficiency using mycobacterium aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 1994, vol. 25, n° 8, pp. 1567-1577.

[13] WAKE D., BOWRY A.C., CROOK B., BROWN R.C. – Performance of respirator filters and surgical masks against bacterial aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 1997, vol. 28, n° 7, pp. 1311-1329.

[14] WILLEKE K., QIAN Y., DONNELLY J., GRINHSPUN S., ULEVICIUS V. – Penetration of airborne micro-organisms through a surgical mask and a dust/mist respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1996, vol. 57, n° 4, pp. 348-355.

[15] CHEN S-K., VESLEY D., BROSSEAU L.M., VINCENT J.H. – Evaluation of single-use masks and respirators for protection of health care workers against mycobacterial aerosols. *American Journal of Infection Control*, 1994, vol. 22, n° 2, pp. 65-74.

[16] Mc CULLOUGH N.V., BROSSEAU L.M., VESLEY D. – Collection of three bacterial aerosols by respirator and surgical mask filters under varying conditions of flow and relative humidity. *Annals of Occupational Hygiene*, 1997, vol. 41, n° 6, pp. 677-690.

[17] BROSSEAU L.M., Mc CULLOUGH N., VESLEY D. – Mycobacterial aerosol collection efficiency of respirator and surgical mask filters under varying conditions of flow and humidity. *Applied Occupational Environmental Hygiene*, 1997, vol.12, n° 6, pp. 435-445.

[18] Mc CULLOUGH N.V., BROSSEAU L.M., VESLEY D. – Collection of three bacterial aerosols by respirator and surgical mask filters under varying conditions of flow and relative humidity. *Annals of Occupational Hygiene*, 1997, vol. 41, n° 6, pp. 677-690.

- [19] BALAZY A., TOIVOLA M., ADHIKARI A., SIVASUBRAMANI K., REPONEN T., GRINSHUPUN S. – Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks ? *American Journal of Infection Control*, 2006, vol. 34, n° 2, pp. 51-57.
- [20] BALAZY A., TOIVOLA M., REPONEN T., PODGORSKI A., ZIMMERA, GRINSHUPUN S. – Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Annals of Occupational Hygiene*, 2006, vol. 50, n° 3, pp. 259-269.
- [21] LEE S-A, GRINSHUPUN S. A., REPONEN T. – Respiratory performance offered by N95 respirators and surgical masks : human subject evaluation with NaCl aerosol representing bacterial and viral particle size range. *Annals of Occupational Hygiene*, 2008, vol. 52, n° 3, pp. 177-185.
- [22] RENGASAMY S., VERBOFSKY R., KING W.P., SHAFFER R.R. – Nanoparticle penetration through NIOSH – approved N95 filtering facepiece respirators. *Journal of the international Society for Respiratory Protection*, 2007, vol. 24, pp. 49-59.
- [23] ENINGER R. M., HONDA T., ADHIKARI A., HEINONEN-TANSKI H., REPONEN T., GRINSHUPUN S.A. – Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Annals of Occupational Hygiene*, 2008, vol. 52, n° 5, pp.385-396.
- [24] QIAN Y., WILLEKE K., GRINSHUPUN S., DONNELLY J. – Performance of N94 respirators: reaerosolization of bacteria and solid particles. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1997, vol. 58, n° 12, pp. 876-880.
- [25] KENNEDY N. J., HINDS W.C. – Release of simulated anthrax particles from disposable respirators. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, vol. 1, n° 1, pp.7-10.
- [26] JOHNSON B., WINTERS D., SHREEVE T., COFFEY C. – Respirator filter reuse test using the laboratory stimulant *Mycobacterium tuberculosis* (H37RA Strain). *Journal of the American Biological Safety Association*, 1998, 3(3), pp. 105-116.
- [27] BROUSSEAU L.M., McCULLOUGH N.V., VESLEY D. – Bacterial survival on respirator filters and surgical masks. *Journal of the American Biological Safety Association*, 1997, vol 2 (3) pp.32-43.
- [28] REPONEN, T.A., WANG Z., WILLEKE K., GRINSHUPUN S.A. – Survival of mycobacteria on N95 personal respirators. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1999, vol. 20, n° 4, pp. 237-241.
- [29] WANG Z., REPONEN T., WILLEKE K., GRINSHUPUN S.A. – Survival of bacteria on respirator filters. *Aerosol Science and Technology*, 1999, vol. 30, n° 3, pp. 300-308.
- [30] PASANEN A.-L., KEINANEN J., KALLIOKOSKI P., MARTIKAINEN P., RUUSKANEN J. – Microbial growth on respirator filters from improper storage. *Scandinavian Journal of Work Environmental Health*, 1993, vol. 19, n° 6, pp.421-425.
- [31] PASANEN A-L., NIKULIN M., BERG S., HINTIKKA E-L. – *Stachybotrys atra corda* may produce mycotoxins in respirator filters in humid environments. *American Industrial Hygiene Association*, 1994, vol. 55, pp. 62-65.
- [32] VISCUSI D.J., KING W.P., SHAFFER R.E. – Effect of decontamination on the filtration efficiency of two filtering facepiece respirator models. *Journal of the international society for respiratory protection*, 2007, vol. 24, pp.93-107.
- [33] VISCUSI D. J., BERGMAN M.S., RIMER B. C., SHAFFER R. E. – Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *Annals of Occupational Hygiene*, 2009, vol. 53, n°8, pp.815-827.
- [34] FISHER E., RENGASAMY S., VISCUSI D., VO E., SHAFFER R. – Development of a test system to apply virus-containing particles to filtering facepiece respirators for the evaluation of decontamination procedures. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, vol. 75, n°6, pp. 1500-1507.
- [35] VO E., RENGASAMY S., SHAFFER R. – Development of a test system to evaluate procedures for decontamination of respirators containing viral droplets. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, vol. 75, n° 23, pp. 7303-7309.
- [36] LI Y., LEUNG P., YAO L., SONG Q.W., NEWTON E. – Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles. *Journal of Hospital Infection*, 2006, vol. 62, pp. 58-63.
- [37] RATNESAR-SHUMATE S., WU C.Y., WANDER J., LUNDGREN D., FARRAH S., LEE J.H., WANAKULE P., BLACKBURN M., LAN M.F. – Evaluation of physical capture efficiency and disinfection capability of an iodinated biocidal filter medium. *Aerosol and Air Quality research*, 2008, vol. 8, n°1, pp.1-18.
- [38] LEE J.H., WU C.Y., WYSOCKI K.M., FARRAH S., WANDER J. – Efficacy of iodine-treated biocidal filter media against bacterial spore aerosols. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, vol. 105, pp. 1318-1326.
- [39] RENGASAMY S., FISHER E., SHAFFER R.E. – Evaluation of the survivability of MS2 viral aerosols deposited on filtering face piece respirator samples incorporating antimicrobial technologies. *American Journal of Infection Control*, 2010, vol. 38, n°1, pp. 9-17.
- [40] ENINGER R. M., ADHIKARI A., REPONEN T., GRINSHUPUN S. A. – Differentiating between physical and viable penetrations when challenging respirator filters with bioaerosols. *Clean-Soil, Air, Water*, 2008, vol. 36, n°7, pp. 615-621.
- [41] LI H. W., WU C.Y., TEPPER F., LEE J. H., LEE C. N. – Removal and retention of viral aerosols by a novel alumina nanofiber filter. *Aerosol Science*, 2009, vol. 40, pp. 65-71.
- [42] REVOIR W., BIEN C.T. – Removal of airborne particles from air by fibrous medium. In : *Respiratory protection handbook*, New-York, Lewis Publishers, 1997, 542 p.
- [43] BÉMER D., RÉGNIER R., CALLÉ S., THOMAS, D., SIMON X., APPERT-COLLIN J.C. – Filtration des aérosols – Performances des medias filtrants. ND 2241, 2006.